



Universidad Carlos III de Madrid.

Departamento de Ingeniería Mecánica.

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales.

## **TRABAJO FIN DE GRADO.**

# **ESTIMACIÓN NUMÉRICA DE PROPIEDADES MECÁNICAS DEL MATERIAL COMPUESTO REFORZADO POR PARTÍCULAS MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS.**

**Alumno: Jairo Peinado Seligrat**

**Tutor: Miguel Marco Esteban**

**Septiembre 2015**

## AGRADECIMIENTOS

*En primer lugar, agradecer a mis padres el gran trabajo, y sobre todo, el esfuerzo que han empleado siempre para sacarme a mi hermana y a mí adelante, sin ellos jamás podría haber cumplido un sueño como este.*

*A mi hermana, que siempre ha tenido su hombro cerca, aún incluso después de nuestras grandes batallas épicas, nunca me ha dejado caer. Y a Jou Mou, gran fuente de risa y locura, hermano, cuñado y amigo a partes iguales.*

*A mis amigos, algunos nuevos, como los grandes Jose y Gonza, con quien juntos hemos saltado por los mismos baches, y algunos viejos, como César, compañero de largas noches de risas y coloquios interminables.*

*A Miguel Marco, tutor, que siempre encontraba un hueco para ayudar a que este proyecto despegase.*

## RESUMEN

El hombre ha conseguido crear materiales capaces de responder de manera cada vez más eficiente a los problemas ingenieriles, que van surgiendo a lo largo de la vida industrial y cotidiana, a partir de los materiales convencionales conocidos hasta ahora, como son los metales, los materiales cerámicos y los polímeros.

Cada uno de estos tipos de material ofrece características diferentes, por lo que sus aplicaciones son ampliamente diversas. Mientras que los metales y los materiales cerámicos presentan altos puntos de fusión y ebullición, y por lo tanto, una buena estabilidad térmica, además de ser rígidos, duros y algunos de ellos dúctiles, los polímeros por el contrario, suelen ser más tenaces y blandos con poca estabilidad térmica, sin embargo, presentan una gran estabilidad química y son más baratos y más ligeros. Es por ello que en la combinación de estos se encontrarán las propiedades óptimas que requieren dichos problemas.

Uno de los materiales compuestos más usados, sin duda, debido a su gran capacidad de transformación geométrica, así como su alta resistencia a tracción, compresión y cortadura, presentando alto grado de isotropía de manera macroscópica y bajo coste, es el material compuesto de matriz metálica con refuerzo de partículas, y en concreto, el de matriz de aluminio, que frente a otros materiales ligeros, es el menos costoso y más fácil de producir.

Por lo tanto, mediante un script escrito en lenguaje Python, se generarán diferentes volúmenes elementales representativos (por sus siglas en inglés RVE) de un MMC (material compuesto de matriz metálica), representados con el programa de diseño y análisis por elementos finitos Abaqus/CAE, lo que permitirá estudiar el comportamiento mecánico de este tipo de material al variar el volumen de inclusiones de refuerzo presentes en la matriz, considerando siempre éste como isótropo, lineal y elástico.

Se ha estudiado un rango de variación del porcentaje en volumen desde un 0 hasta un 35%, en incrementos del 5%, y se ha observado cómo cambian las principales constantes elásticas como el Módulo de Young (E), Módulo de Cortadura (G) y Coeficiente de Poisson ( $\nu$ ).

Mientras que el Módulo de Young y Módulo de Cortadura varían, de 69.5 GPa (0%) hasta los 122 GPa (35%) para el primero, y desde 17.7 GPa (0%) hasta los 29.4 GPa (35%), el coeficiente de Poisson disminuye en poco menos del 14% frente un aumento en la densidad de sólo el 5%, prácticamente despreciables frente al resto de propiedades elásticas.

## ABSTRACT

Human being has created materials that are able to respond more efficiently each time to engineering problems, which are coming out from industrial and habitual life, based on conventional materials known until today, like metals, ceramics and polymers.

Each one of those materials offers quite different characteristics, because of that, their applications are many and different too. While metals and ceramics have elevated fusion and boiling points, then, good thermal stability, toughness and some good ductility as well, polymers on the other hand, are brittle, having poor thermal stability, more stiffness and are chemically stables but cheaper and lighter. That's why on its combining it will be reached optimal properties required by those engineering problems.

Metal matrix composite with particle reinforcement is, without doubt, one of the most used materials thanks to its great capacity for geometrical transformation, so as its high strength and stress resistance giving high grade of macro-isotropy and low cost, in concrete, aluminum matrix composite, which faced to other light ones, is cheapest and easy-manufactured.

Through a script written on Python programming language, it shall generate random representative volume elements (RVE) of a MMC (metal-matrix composite), represented by design and analysis' program, based on finite elements, Abaqus/CAE, that will allow the study about mechanical behavior for this kind of composite varying the reinforcement particles' volume in matrix, considering this as a linear, elastic and isotropic material.

It was being studied a range of variation's percentage in volume from 0% to 35%, with increases of 5%, and it was noticed how main elastic constants change, as like Young's Modulus (E), Shear's Modulus (G) and Poisson's coefficient ( $\nu$ ).

Meanwhile Young's and Shear's moduli vary, from 69.5 GPa (0%) until 122 GPa (35%) for the first one, and from 17.7 GPa (0%) until 29.4 GPa (35%) for the other one, Poisson's ratio decreases about 14% against an increase on density about only 5%, practically depreciable to the rest of the elastic properties.

## ÍNDICE

<b>Capítulo 1: Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación .....	2
1.2. Objetivos .....	3
<b>Capítulo 2: Materiales compuestos .....</b>	<b>4</b>
2.1. Introducción y definición .....	6
2.2. Tipología .....	8
2.2.1. Según el tipo de matriz.....	8
2.2.2. Según el tipo de refuerzo .....	12
2.2.3. Interfase.....	15
2.2.4. Laminados .....	16
2.2.5. Estructuras tipo sándwich .....	17
2.3. Materiales compuestos con matriz de aluminio reforzados con partículas .....	19
2.4. SiC: Definición y propiedades .....	21
2.5. Aplicaciones.....	23
<b>Capítulo 3: Generación del modelo numérico .....</b>	<b>25</b>
3.1. Método de los elementos finitos y Abaqus FEA.....	27
3.1.1. Método de los elementos finitos .....	27
3.1.2. Abaqus .....	29
3.2. Notepad++ y Python .....	31
3.2.1. Notepad++.....	31
3.2.2. Introducción a Python .....	31
3.2.3. Generación de un script en Python.....	32
3.3. Volumen Elemental Representativo (RVE).....	34
3.3.1. Tamaño del RVE.....	35
3.3.2. Tamaño de las inclusiones esféricas .....	36
3.4. Modelado de la estructura .....	38
3.4.1. Módulo “Part” .....	38
3.4.2. Módulo “Property” .....	41
3.4.3. Módulo “Assembly” .....	41
3.4.4. Módulo “Step” .....	43
3.4.5. Módulo “Load” .....	44
3.4.6. Módulo “Mesh” .....	46

3.5.	Análisis de sensibilidad.....	48
3.5.1	Análisis de sensibilidad del mallado .....	48
3.5.2	Análisis de sensibilidad del tamaño del RVE .....	49
<b>Capítulo 4:</b>	<b>Problema a resolver .....</b>	<b>51</b>
<b>Capítulo 5:</b>	<b>Resultados.....</b>	<b>61</b>
5.1.	Módulo de elasticidad (E) .....	62
5.2.	Coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) .....	65
5.3.	Módulo de cortadura (G).....	67
5.4.	Densidad ( $\rho$ ).....	70
<b>Capítulo 6:</b>	<b>Conclusiones y trabajos futuros .....</b>	<b>71</b>
6.1.	Conclusiones .....	72
6.2.	Trabajos futuros .....	73
<b>Capítulo 7:</b>	<b>Planificación y presupuesto.....</b>	<b>74</b>
7.1.	Planificación .....	75
7.2.	Presupuesto .....	79
<b>Capítulo 8:</b>	<b>Bibliografía .....</b>	<b>80</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Madera contrachapada como ejemplo de material compuesto natural laminar [4] .....	6
<b>Figura 2:</b> Fotografía de cristal cerámico reforzado con fibras de carburos de silicio con diámetro de 15 $\mu\text{m}$ [6] .....	10
<b>Figura 3:</b> Cantidad aproximada de producción de materiales compuestos al año en miles de toneladas [7] .....	10
<b>Figura 4:</b> Cadenas de poliamidas aromáticas construyendo fibras de aramida ordenadas espacialmente formando el tejido KEVLAR [4] .....	11
<b>Figura 5:</b> Procedimiento de fundición de acero mezclado con partículas de refuerzo de CCS (partículas de carburos cementados) para aplicaciones en condiciones de alta abrasión [9] .....	12
<b>Figura 6:</b> Campo de tensiones de Von Misses obtenido con el programa Abaqus/CAE para un material de matriz de aluminio 6061 con partículas esféricas dispersas (modelo generado para este proyecto con un 35% de volumen de inclusiones) .....	13
<b>Figura 7:</b> Ejemplo de matriz con refuerzo discontinuo en forma de fibras cortas o whiskers [11]. .....	14
<b>Figura 8:</b> Ejemplo de entretejidos de fibras. A la izquierda tipo Tafetán. A la derecha tipo Sarga. [8] .....	15
<b>Figura 9:</b> Intercara entre matriz y material de refuerzo esférico visto como delgada línea circular roja, generado a partir de un modelo numérico. [10] .....	16
<b>Figura 10:</b> Ejemplo de apilamiento de láminas con objeto de fabricar un laminado isótropo. [5] .....	17
<b>Figura 11:</b> Imagen izquierda, ejemplo de estructura tipo sándwich con relleno como núcleo. Imagen central, ejemplo de panel de abeja. Imagen derecha, ejemplo con núcleo de espuma. [7] .....	18
<b>Figura 12:</b> Matriz para ensayo a compresión de madera de Haya para la extracción de SiC biomórfico. [12] .....	22
<b>Figura 13:</b> Diseño de un Boeing 787 con el morro y alas de matriz de aluminio. [5] .....	23
<b>Figura 14:</b> Capó de un coche a base de material compuesto de matriz de aluminio [5] .....	24
<b>Figura 15:</b> Esquema genérico de un problema físico [14] .....	28
<b>Figura 16:</b> Cálculo de la tensión de Von Misses en el pie de una biela por elementos finitos .....	29
<b>Figura 17:</b> Arranque del programa Abaqus con los diferentes subprogramas de la suite de Abaqus FEA .....	30
<b>Figura 18:</b> ejemplo de script en Python usando Notepad++ .....	31
<b>Figura 19:</b> Diagrama de flujo del script diseñado en Python para el análisis del problema numérico .....	33
<b>Figura 20:</b> RVE para un 25% de volumen de inclusiones .....	34
<b>Figura 21:</b> Material compuesto de aluminio AA1080 con inclusiones de SiC de tamaño 167 $\mu\text{m}$ [22] .....	37
<b>Figura 22:</b> Cubo generado mediante el script en Python, y cara superior particionada .....	39
<b>Figura 23:</b> Inclusión generada mediante script en Python .....	40
<b>Figura 24:</b> Elemento o part “corte” generado mediante script en Python .....	40
<b>Figura 25:</b> conjunto de esferas después de ser cortadas para un porcentaje en volumen del 25% .....	42
<b>Figura 26:</b> RVE generado en Abaqus/CAE para un 20% de inclusiones en volumen .....	43

<b>Figura 27:</b> Encastre en el punto medio de la cara superior del RVE .....	44
<b>Figura 28:</b> Desplazamiento vertical en la cara inferior del RVE .....	45
<b>Figura 29:</b> Restricción del desplazamiento vertical en la cara superior del RVE .....	46
<b>Figura 30:</b> Elemento tetraédrico de 4 nodos .....	46
<b>Figura 31:</b> Elemento tetraédrico de 10 nodos .....	47
<b>Figura 32:</b> Mallado del RVE con tamaño de elemento de 0.1 mm para un 35% de inclusiones .....	47
<b>Figura 33:</b> Variación del módulo de Young [MPa] frente a los diferentes tamaños de malla [mm] .....	49
<b>Figura 34:</b> Gráfica que representa la variación del módulo de Young [MPa] frente al tamaño de arista del RVE [mm] hasta su convergencia.....	50
<b>Figura 35:</b> Interfaz de Abaqus/CAE con los parámetros a definir por el usuario .....	52
<b>Figura 36:</b> Condiciones de contorno sobre el RVE para el cálculo del módulo de cortadura para un 30% de inclusiones en volumen .....	58
<b>Figura 37:</b> Ensayo para la obtención del módulo de cortadura [30] .....	58
<b>Figura 38:</b> Ayuda de la interfaz gráfica (GUI) de Abaqus/CAE para el cálculo de la densidad del material.....	59
<b>Figura 39:</b> Biblioteca de datos para el cálculo de la densidad del material .....	60
<b>Figura 40:</b> Gráfica que representa la variación del módulo de Young [MPa] frente al volumen de inclusiones de SiC en la matriz de aluminio 6061 .....	62
<b>Figura 41:</b> Deformación máxima principal en un modelo empleado para el cálculo de E y $\nu$ con un 35% de volumen de SiC.....	63
<b>Figura 42:</b> Tensión de Von Mises [MPa] en un modelo empleado para el cálculo de E y $\nu$ con un 35% de volumen de SiC.....	64
<b>Figura 43:</b> Desplazamiento [mm] en un modelo empleado para el cálculo de E y $\nu$ con un 35% de volumen de SiC.....	64
<b>Figura 44:</b> Gráfica que representa la variación del coeficiente de Poisson frente al volumen de inclusiones de SiC en la matriz de aluminio 6061 .....	65
<b>Figura 45:</b> Gráfica que representa la variación del módulo de cortadura [MPa] frente al volumen de inclusiones de SiC en la matriz de aluminio 6061 .....	67
<b>Figura 46:</b> Deformación máxima principal en un modelo para el cálculo de G con un volumen de inclusiones de SiC del 35% .....	68
<b>Figura 47:</b> Tensión de Von Mises [MPa] en un modelo para el cálculo de G con un volumen de inclusiones de SiC del 35% .....	69
<b>Figura 48:</b> Desplazamiento [mm] en un modelo para el cálculo de G con un volumen de inclusiones de SiC del 35% .....	69
<b>Figura 49:</b> Gráfica que representa la variación de la densidad del material [ $\text{g/cm}^3$ ] frente al volumen de inclusiones de SiC en la matriz de aluminio 6061 .....	70
<b>Figura 50:</b> Diagrama de Gantt del proyecto.....	78

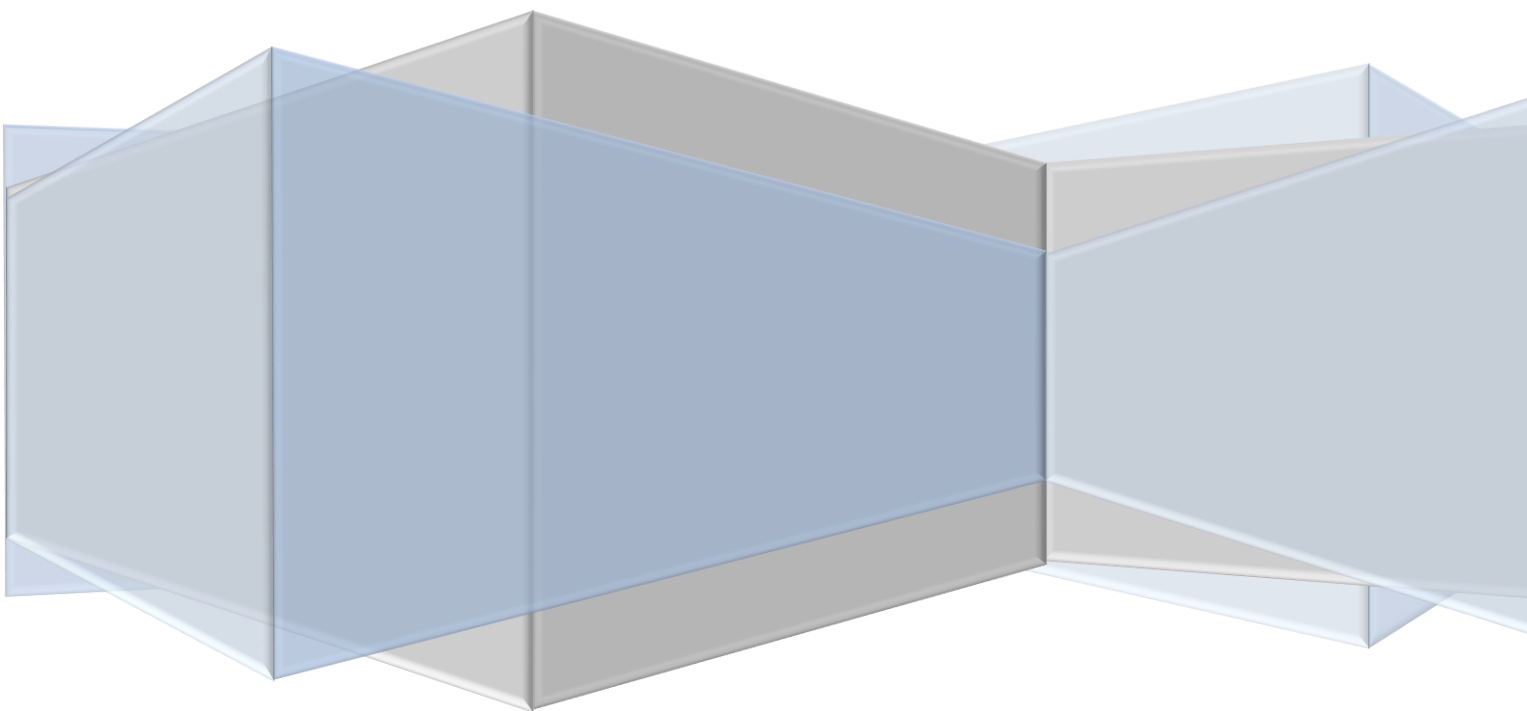


## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Propiedades mecánicas máximas de algunos MMC's comunes. [11] .....	20
<b>Tabla 2:</b> Constantes fijadas para la resolución del problema [25,26] .....	53
<b>Tabla 3:</b> Desglose del presupuesto del proyecto .....	79

# Capítulo 1:

## Introducción



## 1.1. Motivación

A día de hoy, uno de los grandes retos de la ingeniería es crear materiales cada vez más sofisticados, que respondan a nuevas necesidades que surgen como resultado de buscar soluciones a problemas ingenieriles con mayor complejidad. Para atajar este problema, nació la rama de la ciencia e ingeniería de materiales, la cual usando métodos tecnológicos cada vez más avanzados, y la gran capacidad del ser humano para observar el medio y aprender de él, dieron vida a los llamados “materiales compuestos”, los cuales ofrecen unas características mecánicas que solventan en muchas ocasiones los problemas ingenieriles a los que antes nos referíamos.

Este documento se apoyará en el conocimiento adquirido de la ingeniería de los materiales, así como en técnicas de ingeniería mecánica que investigan modelos numéricos que contengan las leyes de comportamiento que rigen el mundo físico, para aproximar pues dichos modelos a la realidad que nos rodea, y más concretamente, simplificar el problema en cuestión de tal modo que dé una visión realista de la buena o mala respuesta mecánica que puedan ofrecer estos nuevos materiales bajo diversas condiciones a las que pueda estar sometido sin tener que recurrir a métodos destructivos.

Estos problemas encuentran solución debido al desarrollo de programas de cálculo cada vez más potentes, basados buena parte de ellos en el método de los elementos finitos, gracias al gran avance de la informática que otorga rápidamente muchos más medios con que continuar dicha investigación. Así pues, podemos usar estos programas para estudiar materiales que ofrezcan por ejemplo, un buen comportamiento mecánico y que además sean ligeros, por ejemplo, para la industria aeronáutica, o naval, así como también proporcionar nuevos materiales de construcción más resistentes, algunos que soporten condiciones extremas de bajas o altas temperaturas, o altos niveles de corrosión, para la industria química o la minería, o incluso prótesis para cuerpos vivos y un largo etcétera. De esta manera podremos pues simular el comportamiento mecánico de los diferentes modelos de estudio (deformaciones, tensiones asociadas a dichas deformaciones, condiciones de fractura...), y comprobar la factibilidad de dichos materiales antes de llegar a construirlos. En nuestro caso, servirá para comprobar si los materiales compuestos ofrecen entonces, mejoras en el comportamiento mecánico frente a materiales no compuestos.

## 1.2. Objetivos

Este proyecto tiene como finalidad la de construir un algoritmo que genere automáticamente, inclusiones esféricas en disposición aleatoria, de material cerámico en una matriz metálica, para más tarde, evaluar el comportamiento de este material compuesto, y comprobar cómo cambian sus propiedades mecánicas dependiendo del volumen de inclusiones en la matriz del material, de la forma más fidedigna, o próxima a la realidad posible.

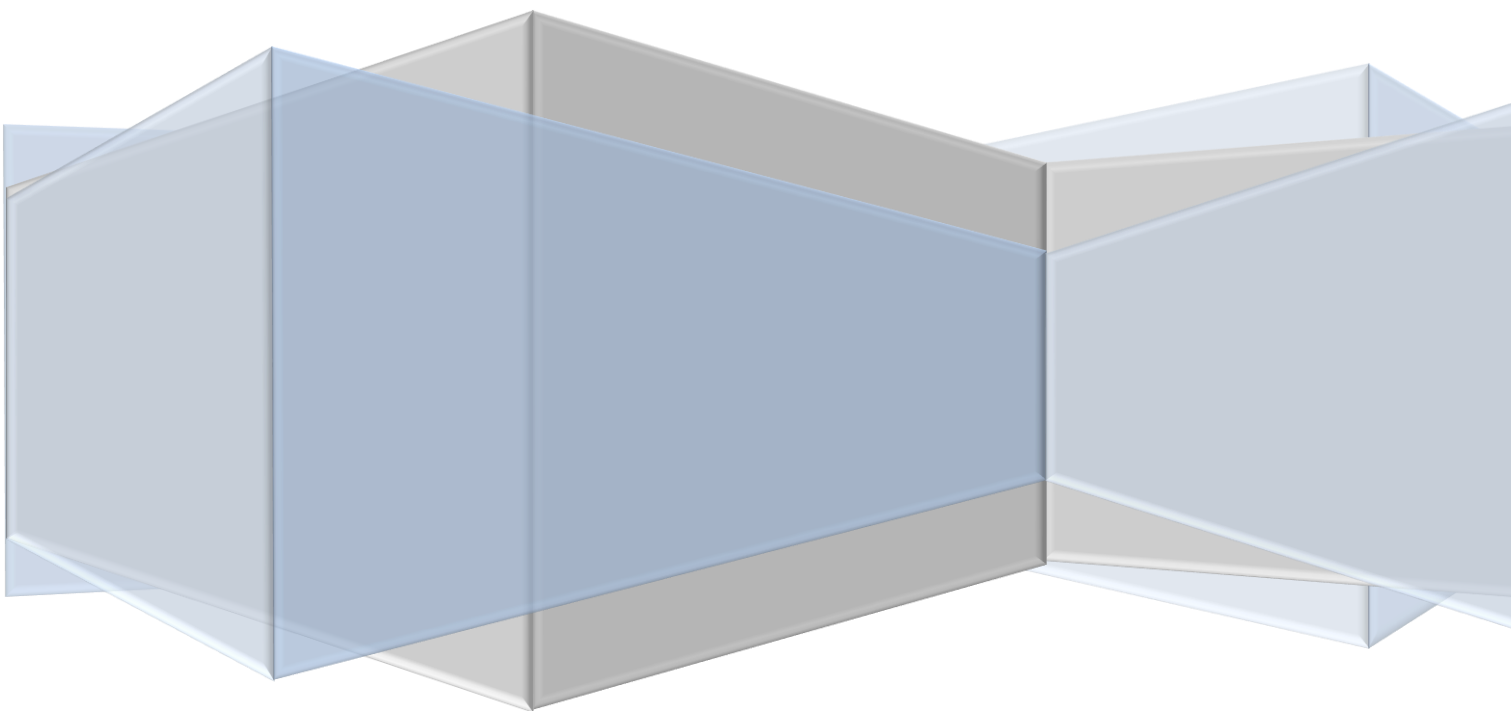
Para ello, se utilizarán dos programas; uno de ellos para generar el código en el lenguaje de programación PYTHON, construido con el programa NOTEPAD++, y dicho código lo leerá el programa de diseño y análisis por ordenador ABAQUS/CAE, el cual resolverá el problema usando el método de elementos finitos. En este programa, estableceremos las condiciones de contorno que aplicaremos en el material, para finalmente evaluar las propiedades mecánicas del mismo.

El motivo fundamental por el que se buscarán las propiedades mecánicas de un RVE es debido a que es muy complejo realizar los estudios experimentales para encontrar algunas de éstas, resultando en muchos casos nubes de puntos muy dispersas, tal como el módulo a cortadura, por lo que es muy interesante realizar este tipo de estudios, que aunque no ofrezcan un resultado exacto, sí que ofrecen una aproximación muy válida.

Por lo tanto, el proyecto busca entonces, crear un programa que genere un material compuesto de matriz metálica con distintos volúmenes de inclusiones cerámicas en el material, y evaluar el comportamiento mecánico en las diferentes situaciones, aplicando las condiciones de contorno apropiadas.

# Capítulo 2:

## Materiales compuestos



Para poder realizar una lectura comprensible de este informe, y conocer entonces las conclusiones a las que se ha conseguido llegar, es necesario primeramente hacer una buena introducción de la materia de estudio que aquí se presenta, esto es, los materiales compuestos.

Se hará una definición entonces del término “materiales compuestos”, así como una clasificación del tipo de materiales que existen actualmente, además de analizar la estructura interna que presentan este tipo de materiales, lo que lleva a estudiar también el gran abanico de propiedades que ofrecen, y por lo tanto, obtener un conocimiento claro de las ventajas y desventajas de su aplicación.

Una vez realizada esta presentación, se pasará a estudiar la tipología de material seleccionado en este proyecto (MMC), así como los principales tipos de refuerzo usados y las aplicaciones más comunes para este tipo de material.

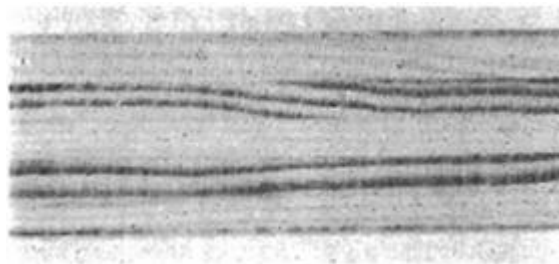
## 2.1. Introducción y definición

En los tiempos que corren, la mayoría de las tecnologías modernas requieren de materiales cuyas propiedades son muy difíciles de conseguir con los metales, cerámicos y polímeros conocidos.

Esta necesidad de encontrar cada vez mayor diversidad de propiedades trae consigo la construcción de materiales avanzados resultado de una mezcla de materiales convencionales como aluminio, resinas, carburos de titanio, etc, recibiendo el nombre de “materiales compuestos” [1].

Un material compuesto es un material multifase que conserva una proporción significativa de las propiedades de las fases constituyentes, o dicho de otro modo, son aquellos formados por dos o más materiales distintos sin que se produzca reacción química entre ellos, de forma que las propiedades del conjunto sean superiores a las propiedades de cada una de las partes por separado [1,7].

Existen materiales compuestos naturales como la madera, resultado de una acumulación de fibras de celulosa embebida en un material rígido llamado lignina, o incluso los huesos, compuestos por colágeno y apatito, sin embargo, los contruidos por el hombre serán objeto de estudio de este informe [1].



**Figura 1:** Madera contrachapada como ejemplo de material compuesto natural laminar [4]

Los materiales compuestos están formados por una fase continua (matriz), que actúa como revestimiento del material de refuerzo, lo que evita que éste sufra daños mecánicos como golpes, erosiones, o químicos como la corrosión, sustancias agresivas, etc, además, evita la propagación de fisuras entre los materiales de refuerzo al encontrarse disperso en la matriz, a la vez que transfiere los esfuerzos a las fases discontinuas, la cual o las cuales soportan dichos esfuerzos gracias a que presentan valores mayores de resistencia a tracción, compresión y cortadura, y en algunos casos, hasta crearán aislamiento eléctrico, o por el contrario, serán parte conductora, dependiendo del tipo [2].



El uso de estos nuevos materiales es conveniente debido a diferentes causas, entre las que se encuentran:

- Alta resistencia
- Bajo peso
- Estabilidad dimensional
- Fácil redimensionamiento de la pieza a utilizar
- Y resistencia a la corrosión entre otros [2, 3].



## 2.2. Tipología

Si se pretende comprender el comportamiento mecánico de estos materiales, es necesario conocer pues su estructura interna, ya que por ejemplo, la colocación de las partículas de refuerzo o el material del que esté hecho condicionará fuertemente la isotropía del material, así como las direcciones en que este alcanzará los mayores valores de resistencia, y por lo tanto, los usos para los que podrán estar destinados dependiendo de cada caso.

### 2.2.1. Según el tipo de matriz

Antes de comenzar a clasificar los materiales, será necesario aclarar la importancia de la matriz en la fabricación del material compuesto, ya que por sí solos, los refuerzos constituyen una parte de muy poco valor ingenieril [6].

- En primer lugar, la matriz mantiene al material de refuerzo unido, manteniendo, si es el caso de fibras, la alineación de estas en las direcciones principales solicitadas. Además, transmite los esfuerzos aplicados sobre el material compuesto, a los materiales de refuerzo que resisten dichas solicitudes.
- Del mismo modo, la matriz aísla a cada partícula de refuerzo o fibra de refuerzo de modo que cada uno puede actuar por separado, lo que por otro lado, permite a la matriz y al resto de materiales de refuerzo continuar ofreciendo las mismas propiedades mecánicas en caso de fallo de alguna inclusión en la matriz.
- La matriz protegerá a las inclusiones de refuerzo de daño mecánico y de ataques del medio ambiente.
- Dependiendo del tipo de material del que puede estar hecha esta matriz, si esta está hecha por un material dúctil, entonces actuará como freno ante rotura catastrófica del material, o por el contrario, puede proveer de mayor dureza.

Atendiendo al tipo de material del que pueda estar hecha esta matriz, podemos encontrar los siguientes tipos de material compuesto [8]:

– **Material compuesto de matriz cerámica o CMC (Ceramic-Matrix Composite)**

Estos materiales son usados debido a la baja densidad que presentan la mayoría de cerámicos, sin embargo, su utilización se debe a características tales como su elevado punto de fusión, o su resistencia a corrosión y abrasión. Su principal desventaja es que son demasiado poco dúctiles, por lo que su transformación geométrica es muy costosa [6].

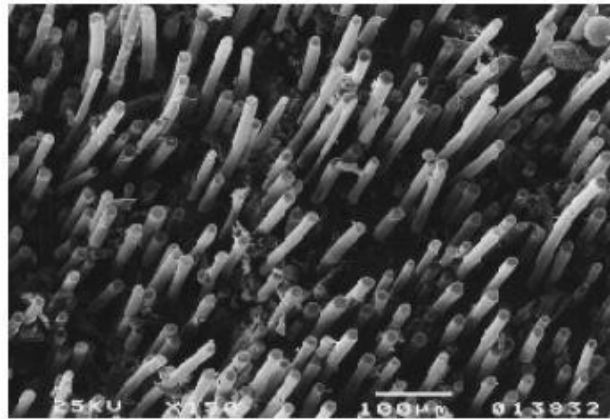
Es este problema por el que, aunque posean una alta dureza, son también muy frágiles, sin embargo, cuentan con una gran capacidad para aguantar saltos térmicos y sus propiedades se mantienen incluso a altas temperaturas, lo cual les hacen ser materiales especiales de aplicación en temperaturas extremas, o industrias como la minera, por lo que el motivo de reforzar este tipo de materiales reside en incrementar su dureza y disminuir dicha fragilidad [6].

Debido a la dificultad que presentan este tipo de materiales para trabajar su forma, la manera más sencilla de añadir refuerzos a este tipo de matrices es a partir de preparados de material cerámico (polvo), los cuales aplicando técnicas de presión a altas temperaturas (hot-pressing), se intenta conseguir que las fibras de refuerzo discontinuas crezcan dentro de la estructura policristalina de la matriz, lo cual implica establecer un control muy exhaustivo en la producción del material [6].

Las matrices más usadas en este campo son:

- Alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )
- Carburo de silicio ( $\text{SiC}$ )
- Nitruro de silicio ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )

Para evitar problemas de inestabilidad química debido a la alta reactividad de los refuerzos con el oxígeno contenido en la matriz del material, se suelen usar recubrimientos entre estos refuerzos para disminuir dicha exposición, sin embargo, para eliminar este tipo de problemas, se pueden encontrar materiales C-C (matriz de carbono con refuerzos de fibras de carbono), o SiC-SiC (matriz de carburos de silicio con refuerzos de fibras de carburos de silicio), no reactivos entre sí [6,11].

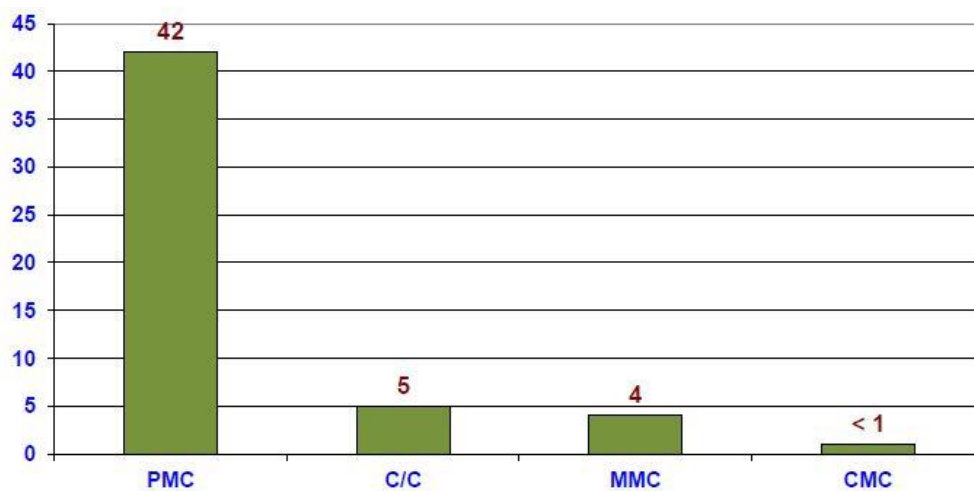


**Figura 2:** Fotografía de cristal cerámico reforzado con fibras de carburos de silicio con diámetro de 15  $\mu\text{m}$  [6]

– **Material compuesto de matriz polimérica o PMC (Polymeric-Matrix Composite)**

Son materiales de baja densidad y fácil fabricación, sin embargo, no poseen grandes propiedades mecánicas, además de tener poca estabilidad térmica y ser poco resistentes a la degradación fotoquímica. Sin embargo, son de fácil fabricación, por lo que su uso está muy extendido, al igual que la investigación acerca de este tipo de materiales [6].

Aunque la degradación química se siga dando aun añadiendo refuerzos, hay que considerar que el aumento de las propiedades mecánicas así como la reducción del comportamiento visco-elástico del mismo son críticos a la hora de utilizar estos materiales en la industria [6].



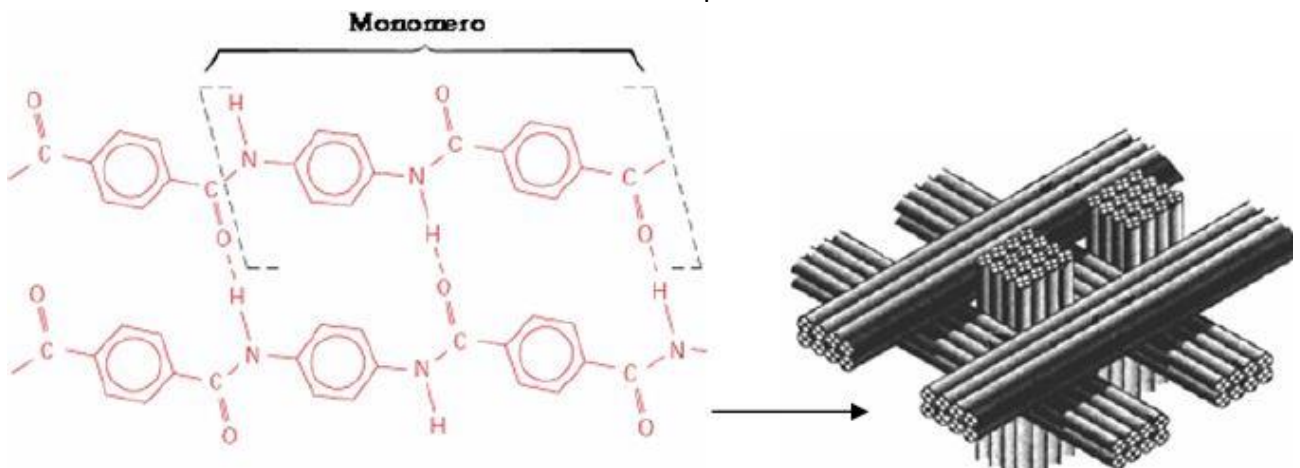
**Figura 3:** Cantidad aproximada de producción de materiales compuestos al año en miles de toneladas [7]

Existen varios tipos de matrices poliméricas [8]:

- Polímero termoplástico:

Esta clase de polímero se diferencia de su hermano termoestable o duroplástico en que es una resina de alta viscosidad capaz de volver a tratarse e incluso cambiar su forma recalentándose hasta su temperatura de fusión, por lo que es posible reprocesarse sin peligro de degradación [5].

Esto hace que su aplicación a media-alta temperatura sea imposible, por lo que no será un material utilizado en altas prestaciones.



**Figura 4:** Cadenas de poliamidas aromáticas construyendo fibras de aramida ordenadas espacialmente formando el tejido KEVLAR [4]

- Polímero elastómero:

Estos poseen la característica fundamental de que son capaces de elongarse enormemente frente a pequeños incrementos de tensión, por lo que son muy utilizados en neumáticos o cintas transportadoras [8].

- Polímero duroplástico o termoestable:

Este tipo de material no puede volver a ser tratado o cambiada su forma una vez alcanzada su forma sólida, lo que significa que una vez curada la resina, esta permanece en estado sólido, por lo que es más recomendable su uso en altas prestaciones que los termoplásticos [5].

Dentro de este tipo de materiales, podemos encontrar matrices **epóxicas**, de uso general en altas prestaciones; **bismaleimidas** y **polimidas**, recomendadas para altas temperaturas (hasta 250°); **fenólicas**, resistentes al fuego y usadas en mamparas contra incendios; y **cianoesteres**, utilizados en aplicaciones radioeléctricas, presentando además, baja absorción de humedad [8].

– **Material compuesto de matriz metálica o MMC (Metal-Matrix Composite)**

Estos son muy usados en distintas aplicaciones debido a que presentan buenas características frente a la corrosión en sus formas aleadas, además de elevados puntos de fusión, gran dureza y cierta ductilidad. Sin embargo, es por su alta densidad lo que propicia su investigación y desarrollo [6].

Dentro de esta familia, podemos hacer dos diferenciaciones importantes: Aquellos MMC destinados a aplicaciones de corte y desgaste (carburos cementados, aceros reforzados con carburos o CCS's...), y aquellos destinados a uso estructural para industrias tales como la aeronáutica o del automóvil, comúnmente llamados “metales duros”, presentando alta rigidez, resistencia y módulos específicos [9,11].

Así pues, y bajo esta diferenciación, es común el uso de metales de transición tales como cobalto, hierro o níquel en el primer grupo, y aluminio, titanio o magnesio para el segundo grupo, recomendables además por su baja densidad [11].



**Figura 5:** Procedimiento de fundición de acero mezclado con partículas de refuerzo de CCS (partículas de carburos cementados) para aplicaciones en condiciones de alta abrasión [9].

### 2.2.2. Según el tipo de refuerzo

Existen tres grandes familias de refuerzo para los materiales compuestos, ofreciendo características diferentes según su orientación o disposición en la matriz, estos son: materiales reforzados con partículas, con fibras y estructurales [7].

– **Reforzados por partículas**

Dentro de este grupo podemos encontrar dos tipos de refuerzo [7]:

- Partículas pequeñas dispersas en la matriz

- El refuerzo por partículas es el menos costoso de producir. Este tipo de materiales se obtiene a través de mecanismos tales como la fabricación en la que se genera un vórtice de material líquido en un molde y se introduce un chorro de partículas de refuerzo en el interior del vórtice hasta que éste se dispersa por la matriz líquida. Otra manera es la producción *in situ* o también *spray* [11].

S, Mises  
(Avg: 75%)

Red	+3.094e+04
Orange	+2.844e+04
Yellow	+2.595e+04
Light Green	+2.346e+04
Green	+2.096e+04
Teal	+1.847e+04
Blue	+1.598e+04
Dark Blue	+1.348e+04
Very Dark Blue	+1.099e+04
Black	+8.497e+03
Dark Blue	+6.003e+03
Very Dark Blue	+3.510e+03
Black	+1.017e+03

Job: Job-1 Load: Load1/Nodes=6.12-1 Thu Jun 23 22:07:01, 10:00:00 AM 2011

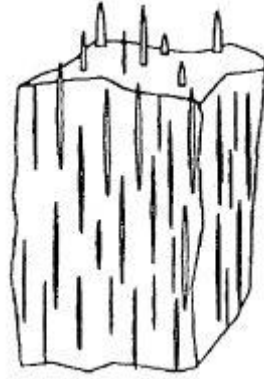
Step: Step-1  
Increment: 11, Step Time = 100.0  
Primary Var: S, Mises  
Deformed Var: U Deformation Scale Factor = 1.000e+00

- **Reforzados por fibras**

- Refuerzo discontinuo o fibras cortas:

Para estas matrices, se suelen usar los llamados *whiskers*, o fibras monocristalinas, orientadas para aumentar la resistencia en una dirección, o no orientadas, para conservar mayores grados de isotropía [7].

Sin embargo, en materiales como los cerámicos, se consiguen fibras que crecen de forma aleatoria sobre la estructura cristalina del material debido a la forma de fabricación (hot-pressing), lo cual hace que el control en la dirección de crecimiento de estas fibras sea muy complejo [6].



**Figura 7:** Ejemplo de matriz con refuerzo discontinuo en forma de fibras cortas o whiskers [11].

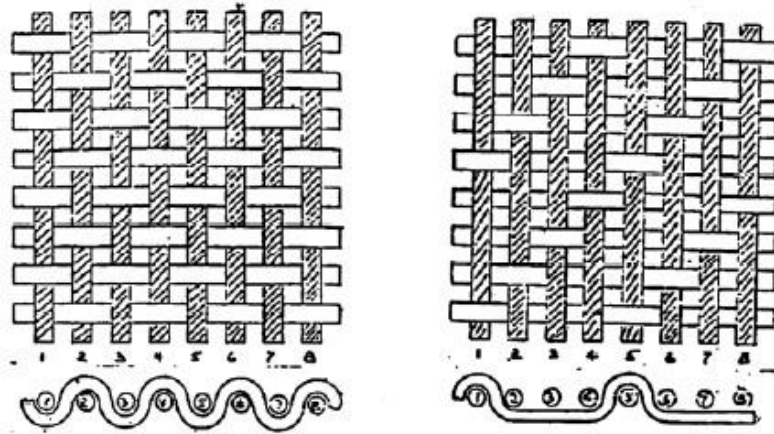
- Refuerzo continuo:

Son fibras largas orientadas presentando un aumento considerable de los módulos de elasticidad y cortadura en la dirección longitudinal de las fibras, sin embargo, existe poca resistencia en dirección perpendicular a la orientación de estas, por lo que es objeto de gran estudio su entretejido para conseguir mayores propiedades en distintas direcciones del material [5].

Así pues, estas fibras continuas pueden presentarse de varias formas dependiendo de la forma en que están entretejidas [8]:

- ✓ Hilos: fibras enrolladas formando un cilindro de diámetro uniforme.
- ✓ Cintas: hilos dispuestos paralelos de forma unidireccional.
- ✓ Fieltros: hilos dispuestos aleatoriamente de forma multidireccional.
- ✓ Tejidos: Hilos entrelazados perpendicularmente. Existen varios tipos, donde el tafetán, el satén y la sarga son los más comunes.





**Figura 8:** Ejemplo de entretejidos de fibras. A la izquierda tipo Tafetán. A la derecha tipo Sarga. [8]

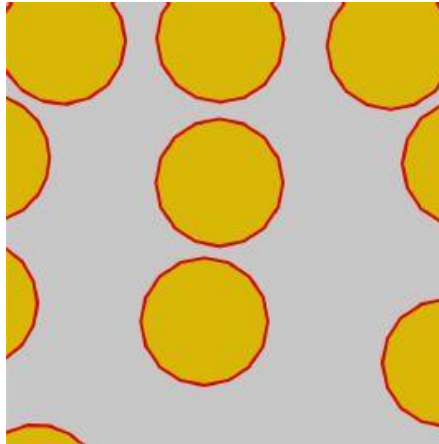
Estas fibras no sólo se clasifican por su disposición, sino, también por el tipo de material del que están hechas [8]:

- ✓ Fibra de vidrio: elaboradas a partir del sílice, presentan gran resistencia a la tracción, son duras, flexibles y resistentes a ataques químicos.
- ✓ Fibra de carbono: de muy alta resistencia y rigidez.
- ✓ Fibra cerámica: de cuarzo o sílice. Muy flexibles y resistentes al choque térmico.
- ✓ Fibra orgánica: obtenidas a partir de polímeros. El más común es la fibra de Kevlar.
- ✓ Fibra de boro
- ✓ Fibra metálica: muy costosas, suelen ser de aluminio, acero y titanio.

### 2.2.3. Interfase

Es imposible estudiar la resistencia de un material compuesto, o los beneficios de fabricarlo sin antes tener en cuenta la interfase o intercara. Cuando se unen dos o más sólidos, y especialmente cuando se realiza dicha unión a través de procesos químicos o térmicos, aparece entre estos una región, más o menos pequeña, cuyas propiedades son muy diferentes de las que se conocen de los materiales que se han unido, y cuya dimensión depende de la naturaleza química y física del material de refuerzo y la matriz [6].





**Figura 9:** Intercara entre matriz y material de refuerzo esférico visto como delgada línea circular roja, generado a partir de un modelo numérico. [10]

El problema principal es que una vez aplicado un campo de desplazamientos sobre el contorno del material, la frontera entre la matriz y el material de refuerzo, si ésta es óptima, obligará a ambos a deformarse como uno solo, sin embargo, a menudo resulta que el material rompe a menores tensiones que las esperadas debido a que la suposición que se hizo no es correcta [6].

Es muy necesario por tanto utilizar materiales cuyas características de deformación sean lo más próximas posibles, esto es, por ejemplo, utilizar materiales con similares coeficientes de dilatación y conductividad térmica, con lo que se controlará en gran medida la acumulación de tensiones residuales y distorsiones [7].

Por lo tanto, para discutir acerca de la resistencia y dureza de los compuestos, es necesario observar qué ocurre en esta región ya que supondrá la diferencia entre un material satisfactorio y uno inadecuado [6,10].

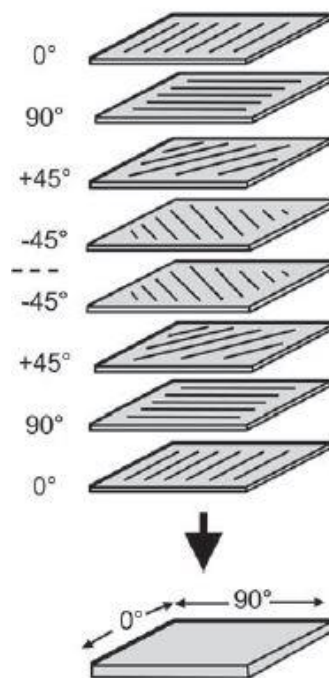
#### 2.2.4. Laminados

Es un material de matriz polimérica que pertenece dentro de la clasificación de *materiales compuestos estructurales* al igual que los de tipo sándwich, sin embargo, debido a su tipología, es necesario explicar ambos por separado.

Se le llama lámina a una capa de fibras continuas orientadas de manera unidireccional (paralelas) [4], de modo que el apilamiento de láminas sucesivas variando el ángulo de apilamiento se le llama laminado [5].

Los materiales compuestos reforzados por fibras continuas son materiales laminados cuyas fibras o hilos son orientados de forma que se intensifique la resistencia en las direcciones principales de carga, por lo que serán muy duros y resistentes en un ángulo de  $0^\circ$ . Sin embargo, en un ángulo de  $90^\circ$ , perpendicular a la orientación de las fibras, esta resistencia es despreciable frente a la resistencia que ofrece el material en una dirección de  $0^\circ$  con respecto a la orientación de las fibras, debido a que será la matriz polimérica la responsable de resistir toda la carga aplicada sobre el compuesto ya que las fibras sólo resistirán a compresión y a tracción [5].

Por lo tanto, debido a que la orientación de las fibras impacta directamente en las propiedades mecánicas del compuesto, parece lógico apilar varias láminas en distintos ángulos de apilamiento intentando entonces, la fabricación de un material isótropo



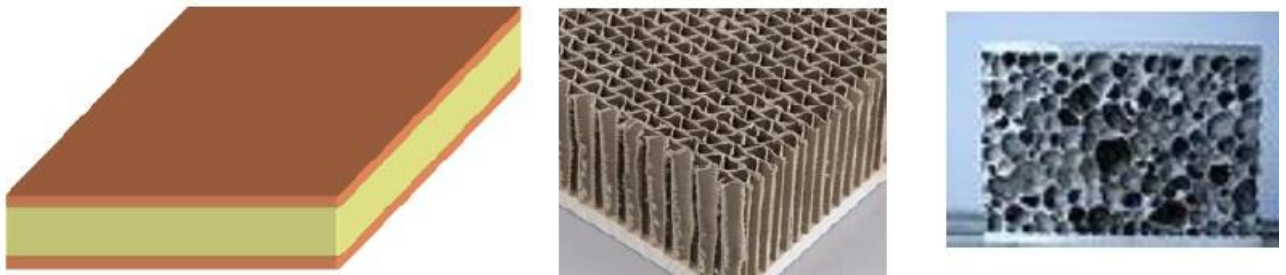
**Figura 10:** Ejemplo de apilamiento de láminas con objeto de fabricar un laminado isótropo. [5]

### 2.2.5. Estructuras tipo sándwich

Son un tipo especial de material compuesto formado por la adhesión de dos caras o revestimientos relativamente delgados a un núcleo central, mucho más espeso y de baja densidad. Esta adhesión entre el núcleo y los revestimientos puede ser a través de adhesivos o no dependiendo del modo de fabricación.

Las caras pueden ser metálicas, normalmente fabricadas con alguna aleación de aluminio, o de material no metálico, usando laminados de fibra de carbono, Kevlar o fibra de vidrio.

Los núcleos se suelen fabricar con aluminio o NOMEX (tipo de material compuesto), basando su tipología normalmente en el llamado “panel de abeja”, o incluso espumas (núcleo formado por un material con oquedades interiores lo que reduce la densidad del mismo), y rellenos (pastas de baja densidad usadas para conseguir núcleos macizos) [8].



**Figura 11:** Imagen izquierda, ejemplo de estructura tipo sándwich con relleno como núcleo. Imagen central, ejemplo de panel de abeja. Imagen derecha, ejemplo con núcleo de espuma. [7]

### 2.3. Materiales compuestos con matriz de aluminio reforzados con partículas

La elección del tipo de material a representar en este proyecto ha sido entonces un material compuesto de matriz metálica (MMC), basado en una matriz de aluminio reforzado con partículas, y es que es precisamente de este material, de aluminio y sus aleaciones, de los que se fabrican la mayoría de MMC's por su característica principal, su gran ligereza, además, en comparación con materiales como el titanio o el magnesio, este es relativamente más barato.

Presenta características muy valoradas en la industria como son su resistencia mecánica, a la corrosión y su gran ductilidad.

Las principales aleaciones de aluminio frecuentemente usadas son del tipo Al-Cu-Mg y Al-Zn-Mg-Cu, con la reciente incorporación de Al-Li.

Por otro lado, en cuanto a refuerzo se refiere, es frecuente encontrar los MMC's reforzados con fibras continuas en la industria aeroespacial, sin embargo, y aunque ofrecen propiedades mucho más moderadas que los reforzados con fibras continuas, son los reforzados con partículas los que presentan una alternativa mucho menos costosa que los reforzados con fibras continuas.

Debido a su gran ductilidad, estos materiales son buenos para mecanizado y soldadura, lo que suponen ser de gran interés.

Las partículas de carburo de silicio (SiC) son uno de los refuerzos discontinuos más utilizados en la fabricación de Al-MC's (**A**luminum-**M**atrix **C**omposite) junto con la alúmina, debido a su bajo precio, a su gran variabilidad de productos, y a que elevan de forma considerable los módulos de elasticidad y resistencia del material. La alúmina sin embargo, es mucho más inerte (menos reactiva) que el SiC y más resistente a la corrosión que éste.

Para tratar de solucionar el problema de la reactividad del SiC en matrices de aluminio, la manera de fabricación suele ser preimpregnar estas partículas y después infiltrarlas en la matriz con spray, de modo que la fase líquida de SiC atomizada por un gas rocía la preforma de la matriz recubriéndola.

Otro aspecto importante es la resistencia a fractura, la cual se produce de manera dúctil en la interfase de la matriz-refuerzo, y frágil en el refuerzo, de modo que a menor cantidad de refuerzo, aumenta la tenacidad a la fractura, lo que propicia una rotura dúctil, más controlable que la frágil, y es que es también en la intercara matriz-refuerzo donde se espera se generen las grietas, por lo que en cuanto a fatiga se refiere, es necesario un control del tamaño de partícula además de un control en volumen de partículas en la matriz para reducir al máximo estos dos problemas mecánicos. [11]

**Tabla 1:** Propiedades mecánicas máximas de algunos MMC's comunes. [11]

Matriz	Refuerzo	Fracción (% vol.)	Resistencia a la tracción longitudinal (MPa)	Módulo elástico longitudinal (GPa)
Al-7Zn	Fibra de grafito	40	90	190
Al 2024	Fibra de boro	60	1.500	270
Al 6061	Fibra de SiC	50	1.500	205
Al 2024	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 50	450	175	
Al 6061	Whisker de SiC	15	480	100
Al 6061	Partícula de SiC	15	370	100
Ti-6Al-4V	BORSIC40	900	205	
Ti-6Al-4V	SCSC-635	1.600	240	
Ti-6Al-4V	Sigma SM1240	35	1.550	230
Mg	Fibra de grafito	40	560	230
Mg	Fibra de SiC	50	1.300	230

## 2.4. SiC: Definición y propiedades

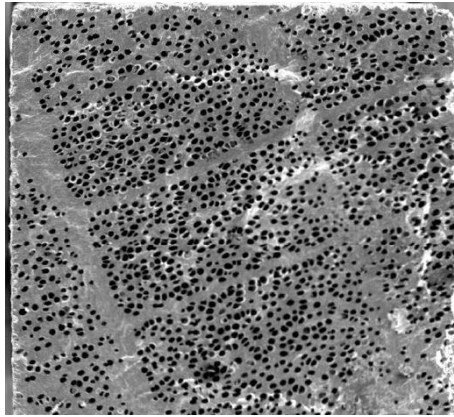
Como bien se ha dicho anteriormente, el carburo de silicio o SiC es uno de los principales tipos de partículas usadas en la fabricación de los MMC's, y en concreto, de los Al-MC's que es material de estudio de este informe, por lo tanto, no está de más comentar el por qué de su elección.

En la actualidad, este material es especialmente valorado debido a sus aplicaciones estructurales gracias a características tales como:

- Alta dureza muy próxima a la del diamante
- Resistencia a altas temperaturas gracias a la microestructura que presenta. Siendo un material cerámico, sus puntos de fusión y ebullición son, naturalmente, muy altos.
- Alta conductividad térmica, lo que facilita la difusión de la temperatura, beneficiosa por lo tanto en materiales compuestos.
- Bajo coeficiente de expansión térmica, por lo que la dilatación que presenta el sólido es baja. Recomendable su uso en materiales compuestos de matrices rígidas debido a que limitará la fatiga térmica y la fractura del material.
- Resistencia al desgaste y la abrasión, por lo que reducirá la fractura en materiales compuestos.
- Su uso está muy extendido en la electrónica debido a su carácter semiconductor en forma de fibras.
- Baja densidad.

En cuanto a sus aplicaciones son varias y su uso está muy extendido en muchos sectores de la industria, entre las que destacan por ejemplo, su uso en componentes de turbinas, automoción, blindajes y armaduras, vigas...

Debido a esto, se han propulsado diversas formas de obtención del mismo tales como la deposición química en fase vapor (CVD) por la cual una serie de agentes químicos reaccionan en fase vapor formando una superficie sólida cristalina, obteniendo porcentajes muy altos de pureza y densidad; síntesis autopropagada a alta temperatura (SHS), o síntesis por combustión, etc... [12]



**Figura 12:** Matriz para ensayo a compresión de madera de Haya para la extracción de SiC biomórfico. [12]

## 2.5. Aplicaciones

Como ya se ha destacado varias veces, las aplicaciones de los MMC's en la industria son muchas y muy diversas por lo que se potencia mucho la investigación y desarrollo de cada vez nuevos materiales que respondan con mayor eficacia a los problemas que continuamente aparecen en diseños estructurales.

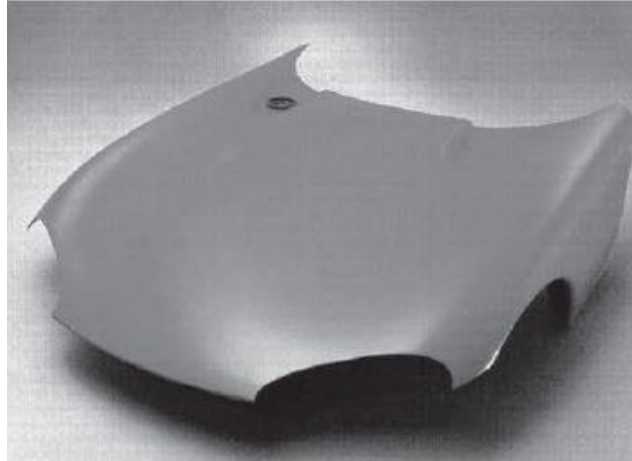
Es frecuente el uso de éstos en, por ejemplo, aeronáutica debido a su resistencia, rigidez y bajo peso, sin embargo, su uso más extendido suele ser MMC's reforzados con fibras continuas, ya que con whiskers o partículas, no ofrecen altas prestaciones a alta temperatura [11].



**Figura 13:** Diseño de un Boeing 787 con el morro y alas de matriz de aluminio. [5]

En la industria de la automoción, sin embargo, el uso de refuerzo discontinuo es el más prometedor, presentando su principal ventaja como es su bajo precio frente a buenas propiedades mecánicas, además, gracias al bajo peso que presentan este tipo de materiales, es posible disminuir el peso total de los vehículos con la consecuente disminución del consumo de combustible. Sin embargo, es de especial interés ofrecer sendos estudios acerca de la respuesta a fatiga, fluencia y fractura de estos materiales para aplicaciones en motores o pistones de los vehículos, donde las condiciones de temperatura suelen hacerse críticas [11].



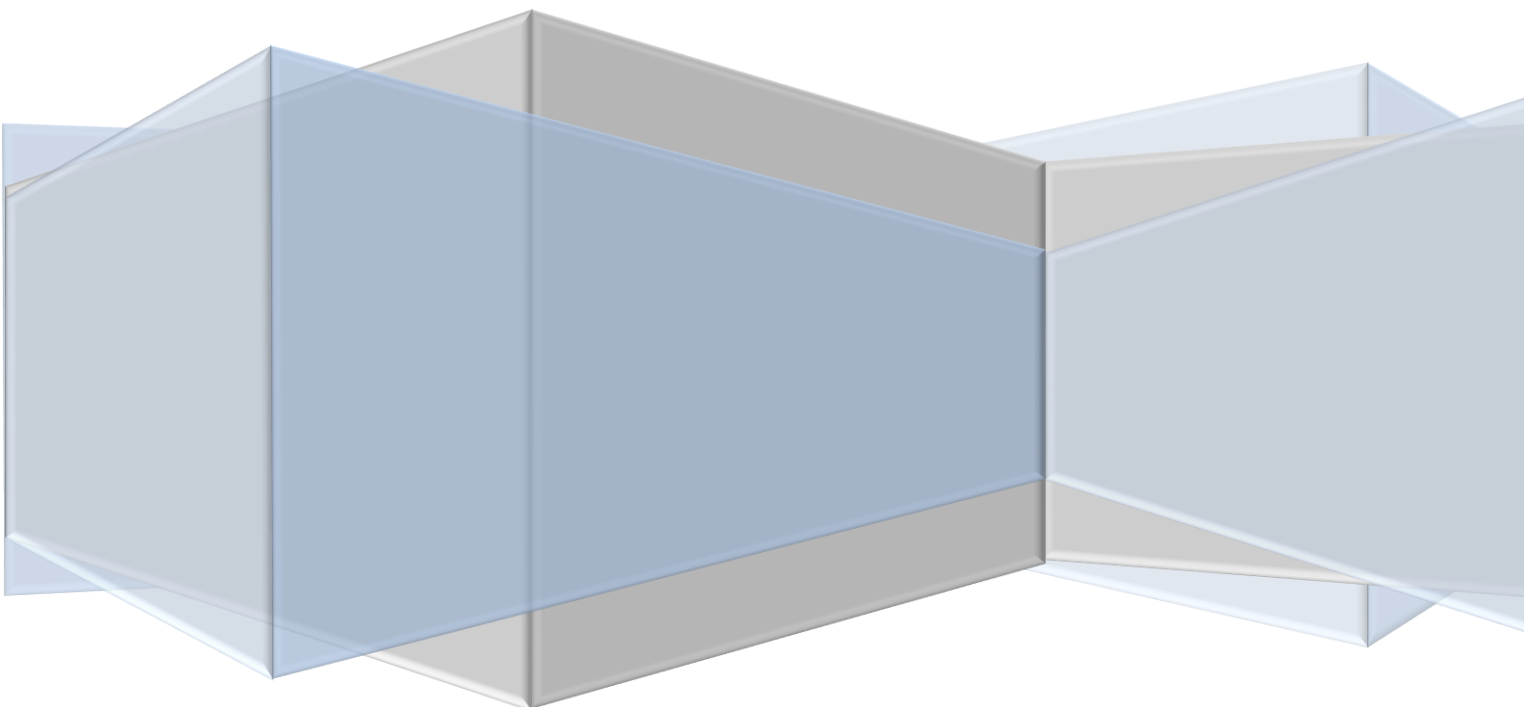


**Figura 14:** Capó de un coche a base de material compuesto de matriz de aluminio [5]

En la industria electrónica, el refuerzo de MMC's con fibras de carbono o de SiC pueden combinarse de forma adecuada ofreciendo buenas propiedades térmicas, lo que favorecerá su conductividad térmica y por lo tanto, su conductividad eléctrica.

# Capítulo 3:

## Generación del modelo numérico



En esta sección se procederá a explicar cómo se ha construido el modelo numérico del material de estudio, en el cual se diferencian claramente las inclusiones del material de refuerzo, y la matriz metálica en las que están incluidas. Esto se conseguirá modelando un volumen representativo de la matriz, suficiente para poder estudiar sus propiedades mecánicas al variar la fracción de volumen de inclusiones introducidas.

Se dará una pequeña explicación del método de cálculo numérico (MEF), así como una breve introducción al programa Abaqus/CAE. Además, se intentará presentar el programa en el que se ha construido el script (Notepad++), y el lenguaje utilizado en la generación del modelo numérico: Python.

Por otro lado, se darán a conocer algunas definiciones importantes:

- **RVE** o Volumen Elemental Representativo
- **Tamaño del RVE**
- **Tamaño de las inclusiones**

El último paso será realizar los análisis, tanto de sensibilidad del tamaño del RVE, como de sensibilidad de la malla, para optimizar de manera apropiada, la precisión de los resultados.

### 3.1. Método de los elementos finitos y Abaqus FEA

Antes de comenzar a definir los pasos seguidos, se hará una pequeña introducción de los programas utilizados en la elaboración de este proyecto, así como el método de cálculo que utiliza el programa de simulación para resolver el problema propuesto. Cabe destacar que el programa ABAQUS/CAE es puntero en el cálculo numérico y simulación, siendo muy apreciado en el ámbito de la ingeniería industrial.

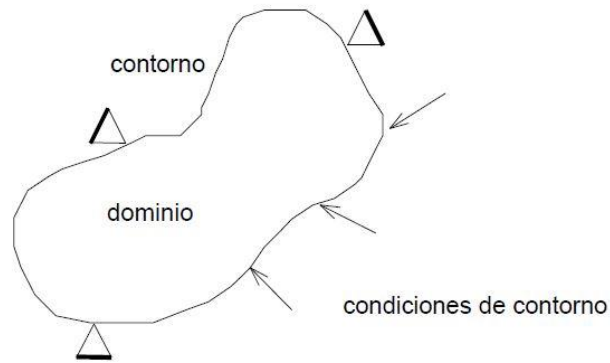
#### 3.1.1. Método de los elementos finitos

El Método de los Elementos Finitos es un método numérico de resolución de problemas de Mecánica de Sólidos y una herramienta de cálculo muy potente, sin embargo, no es un método que proporciona una solución “exacta” a un problema dado, sino que, ofrece una aproximación más o menos realista que en muchos casos es suficiente para la resolución de un problema práctico [13].

Consiste en subdividir el conjunto continuo que se va a estudiar en pequeñas partes (elementos) interconectadas entre sí a través nudos o nodos, de manera que se supondrá que, el campo de desplazamientos en el interior de cada elemento, puede expresarse en función de los desplazamientos que sufren los nodos del elemento (desplazamientos nodales). De esta forma se consigue pasar de un sistema continuo con infinitos grados de libertad, regido por un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema finito de elementos (grados de libertad finito), modelando su comportamiento a partir de ecuaciones, que pueden ser lineales o no. A este proceso se le denomina “discretización” [14].

Podemos distinguir en cada problema:

- **Dominio:** Espacio geométrico que será objeto de estudio
- **Condiciones de contorno:** Variables conocidas que condicionan el campo de desplazamientos del sistema (tensiones, deformaciones...)
- **Incógnitas:** Variables del sistema que queremos conocer, resultado de la imposición de las condiciones de contorno sobre el sistema.



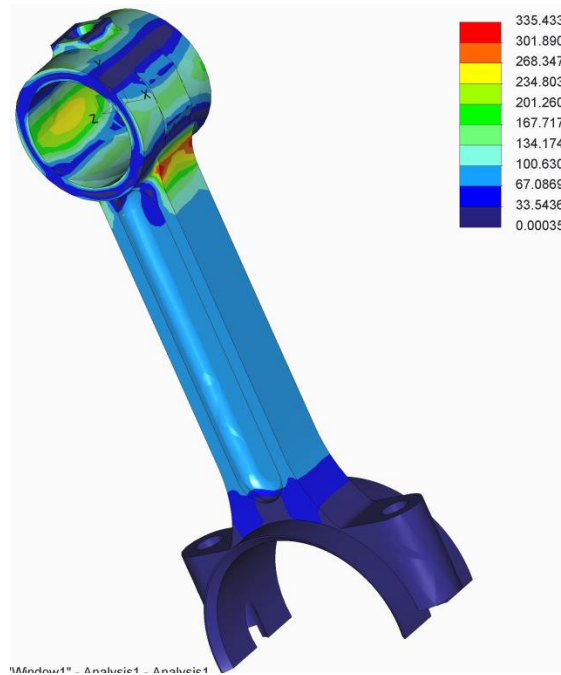
**Figura 15:** Esquema genérico de un problema físico [14]

Así que, una vez discretizado el dominio y aplicadas las ecuaciones que definen el desplazamiento nodal, a través de ciertas funciones de interpolación, se es capaz de aproximar el campo de desplazamientos del elemento en función del desplazamiento que sufren los nodos tras aplicar las condiciones de contorno sobre el sistema. Así pues, también podemos conocer las tensiones y deformaciones en los nodos aplicando las ecuaciones generales de la elástica [14].

Para conseguir calcular el problema, es necesario modelizarlo con diferentes tipos de elementos, los cuales reproducen el cuerpo o cuerpos geométricos que constituirán el dominio a estudiar, y que formarán el conjunto de subdivisiones finitas del dominio de estudio, lo que comúnmente se denomina “malla”. Entre estos elementos podemos encontrar los llamados tipo barra, tipo viga, tipo celda... para el caso de 2D, y tipo tetraédrico, hexaédrico... para el caso de 3D [13].

Del mismo modo, podemos elevar el número de nodos del sistema discretizado, por lo que aumentará el sistema de ecuaciones a resolver y también la precisión de resultados obtenidos, y por lo tanto, el tiempo de cálculo en la resolución del problema.

El MEF permite realizar un modelo matemático de cálculo del sistema real, más fácil y económico de modificar que un prototipo en muchos casos. Ha sido precisamente el avance informático el que ha puesto a disposición de los usuarios gran cantidad de programas que permiten realizar cálculos con elementos finitos.



**Figura 16:** Cálculo de la tensión de Von Misses en el pie de una biela por elementos finitos

### 3.1.2 Abaqus

Abaqus/CAE es uno de la suite de programas de cálculo por elementos finitos parte de la plataforma SIMULIA de Dassault Systemes que proporciona un portafolio de soluciones de análisis y simulación 3D por elementos finitos, utilizado en el cálculo estructural tanto para aplicaciones en el sector de la aeronáutica, como de la biomecánica, minera, automovilística, etc. [15]

Abaqus FEA se compone de diferentes programas, cada uno construido para el cálculo y diseño de diferentes problemas estructurales, estos son:

- **Abaqus/CAE:** Este programa permite computerizar en 3D, un elemento mecánico real, así como un conjunto formado por diferentes elementos.  
Se pueden construir scripts que automaticen el proceso de modelado a través de lenguaje Python, o importar geometrías de otros programas de diseño CAD como solidworks, CATIA, Pro/ENGINEER, etc.  
Además, consta de módulos de visualización de resultados y administración de análisis, y postprocesado de datos.
- **Abaqus/Standard:** Programa diseñado para el cálculo de problemas estáticos y dinámicos de baja velocidad, tales como propagación de grietas, perturbaciones lineales, cargas estáticas, tanto en dominio de frecuencia como en el del tiempo.

- **Abaqus/Explicit:** Diseñado para resolver y simular por elementos finitos, problemas dinámicos o no lineales como choques, impactos, caídas libres, balísticos, consumos electrónicos, etc.
- **Abaqus/CFD:** Aplicación que se especializa en el cálculo de problemas en los que interviene la dinámica de fluidos.

Los programas utilizados en cada fase de análisis en este proyecto serán entonces:

- Abaqus/CAE, tanto para realizar la importación del script para la automatización del proceso de modelado, como la visualización de resultados y post-procesado de datos
- Abaqus/Standard para la resolución automática del problema en cuestión.

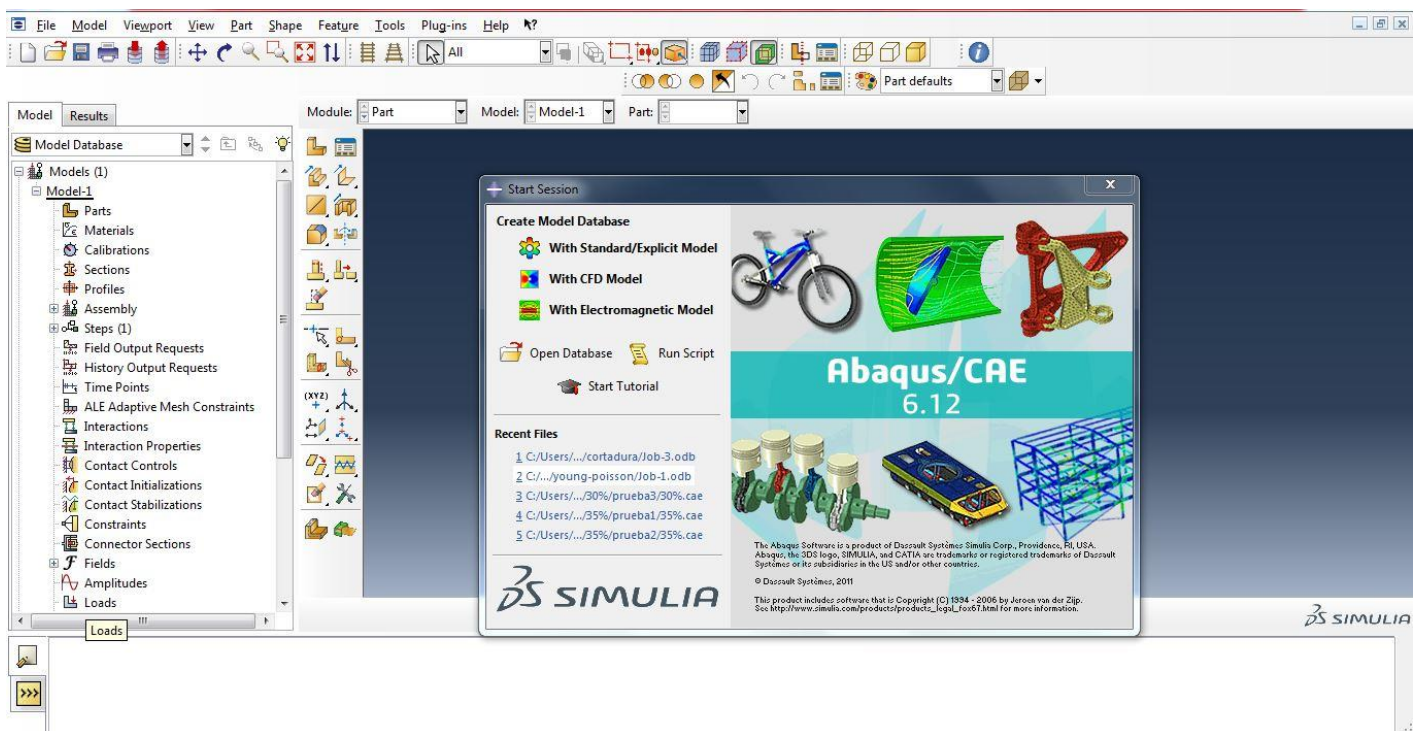


Figura 17: Arranque del programa Abaqus con los diferentes subprogramas de la suite de Abaqus FEA

## 3.2. Notepad++ y Python

### 3.2.1 Notepad++

Notepad++ es un editor gratuito de código fuente que soporta varios lenguajes de programación, utilizado en la generación de scripts para la construcción y edición de programas informáticos. Se ejecuta en el entorno MS Windows, y es capaz de manejar ficheros C, C++, Java, HTML, PHP, Javascript, SQL, Python y MATLAB entre otros. [16]

Entre las ventajas frente a otros editores se encuentran:

- La sintaxis y envoltura de sintaxis coloreada
- Soporte para buscar y reemplazar expresiones
- Herramientas de zoom
- Apertura de multi-documento
- Y resaltado de marcas y sangría entre otros.

```
for i in range(2,len(matrix)):
    nombre = 'Part_' + str(i) + '-1'
    nombre_sig = 'Part_' + str(i+1)
    quitar = 'Part_' + str(i)
    a.InstanceFromBooleanMerge(domain=GEOMETRY, instances=(matrix[i], a.instances[nombre]), keepIntersections=ON, name=nombre_sig,
    del a.instances[nombre]
    del mdb.models['Cubo reforzado'].parts[quitar]
    if i+1 == len(matrix):
        cambiar='Part_' + str(i+1) + '-1'
        mdb.models['Cubo reforzado'].rootAssembly.features.changeKey(fromName=cambiar, toName='transicion')

a.regenerate()
if frac>0.1:
    a.Instance(dependent=ON, name='corte-1', part=mdb.models['Cubo reforzado'].parts['corte'])
    a.translate(instanceList=('corte-1', ), vector=(-(lado+4*radio)*0.5, -(lado+4*radio)*0.5, -(lado+4*radio)*0.5))
    a.Instance(dependent=ON, name='corte-2', part=mdb.models['Cubo reforzado'].parts['corte'])
    a.rotate(angle=90.0, axisDirection=(0.0, lado+4*radio, 0.0), axisPoint=(0.0, 0.0, 0.0), instanceList=('corte-2', ))
```

Figura 18: ejemplo de script en Python usando Notepad++

### 3.2.2. Introducción a Python

Python nació de la mano de Guido van Rossum, un programador de origen holandés que desarrolló este lenguaje de programación a finales de los años 80 para el Centro para las Matemáticas y la Informática de los Países Bajos.

Es un lenguaje de programación de alto nivel que fue diseñado de tal modo que la lectura del código fuese sencillo de leer y fácil de interpretar.



De este modo, podemos encontrar tabulaciones o espacios para declarar nuevos bloques en lugar de utilizar símbolos, como las famosas llaves en lenguaje C, o la utilización de palabras tipo “and” u “or” en lugar de los símbolos para operadores lógicos.

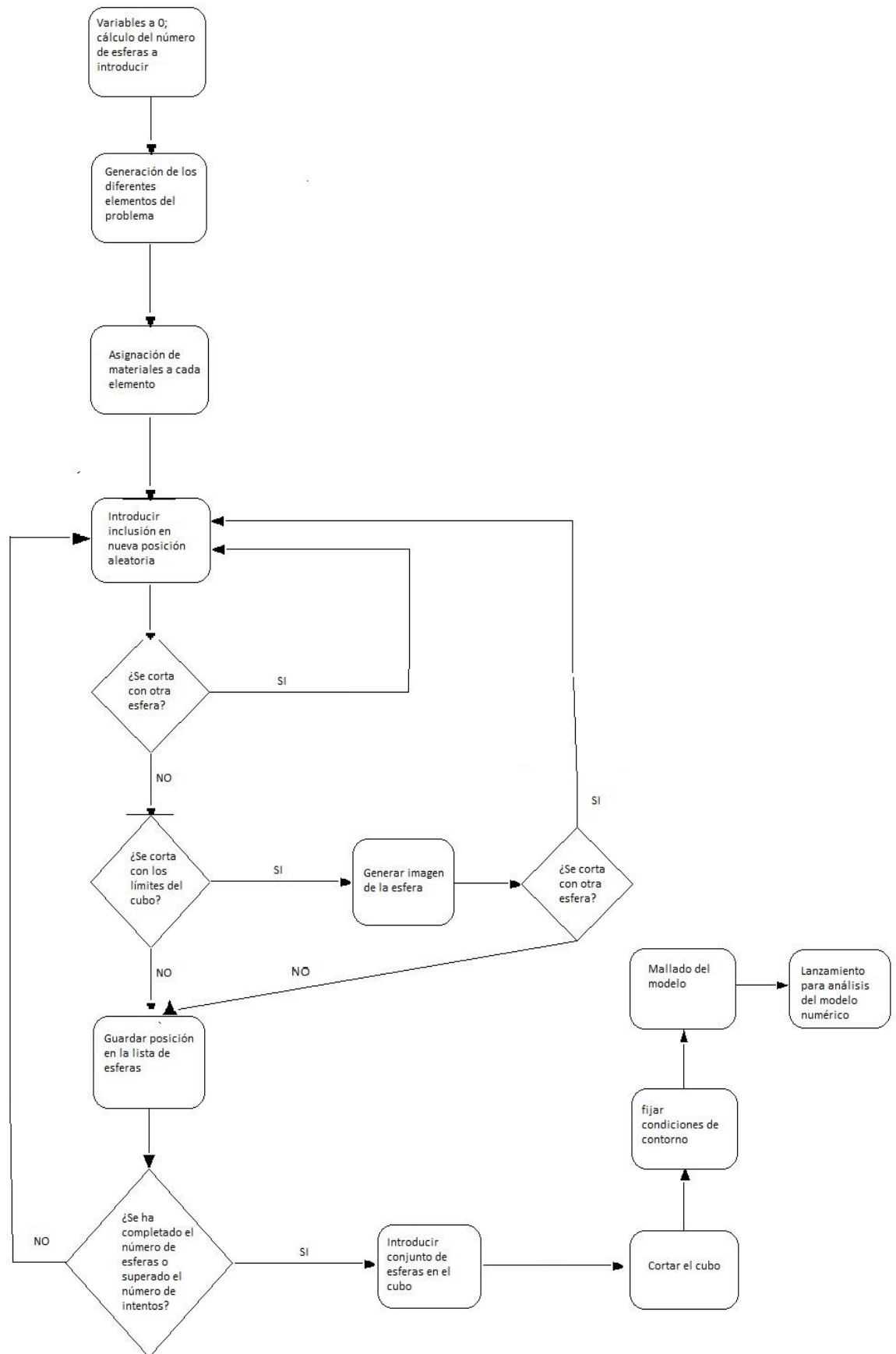
Admite varios estilos de programación siendo pues multiplataforma, y soporta la programación orientada a objetos, lo que facilita la construcción de scripts para programas con interfaz programable tales como Abaqus, Fluent, etc; a parte, permite la programación funcional e imperativa [17].

### 3.2.3. Generación de un script en Python

Una de las mayores dificultades a la hora de realizar este proyecto fue sin duda la construcción del código que automatiza el proceso de modelizado, mallado, y análisis del RVE, al cual se accederá durante el pre-procesado en Abaqus. Éste script contiene la información necesaria para modelizar el problema en su conjunto mediante el lenguaje Python [18,19], de modo que se podrá ordenar su ejecución sin entrar a los módulos de diseño e interfaz gráfica que contiene Abaqus/CAE.

Para importar un trabajo a Abaqus, podemos proceder de dos modos distintos:

- El primero de ellos, nada más iniciar el programa, nos encontramos con una ventana emergente donde seleccionaremos la opción “Run Script” y buscamos el trabajo a importar.
- El segundo de ellos, si decidimos abrir un proyecto nuevo, debemos pinchar en “file” → “Run Script” y seleccionamos el trabajo a importar.

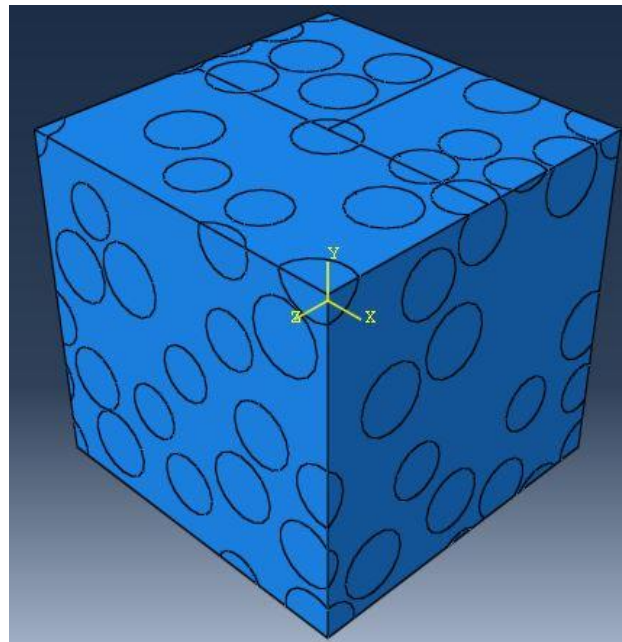


**Figura 19:** Diagrama de flujo del script diseñado en Python para el análisis del problema numérico

### 3.3. Volumen Elemental Representativo (RVE)

Para poder estimar las propiedades mecánicas de un material como el propuesto en este documento, se necesita un modelo computerizado tridimensional que simule y haga las veces de un modelo real, con una geometría sencilla de analizar, y que al aplicar el método de los elementos finitos del que se ha hablado antes, los resultados que se obtengan sean extrapolables a cualquier estructura de este tipo, siendo estos lo más reales posibles, o con alto grado de exactitud.

Para ello, se utilizará lo que en teoría de materiales compuestos se llama “Representative Volume Elements” (RVE) o en castellano, Volumen Elemental Representativo, por lo que la elección correcta de la geometría será clave para una correcta obtención de resultados, tal y como se exponía en el párrafo anterior [10].



**Figura 20:** RVE para un 25% de volumen de inclusiones

De modo que para imitar al modelo real, se creará un molde cúbico (matriz metálica de aluminio) en el que se dispondrán inclusiones esféricas que harán las veces de material cerámico, que en nuestro caso serán de carburos de silicio, por lo que tanto a la matriz como a las inclusiones se les asignarán las propiedades elásticas propias de cada material escogido.

Así que, se puede decir que el RVE constará de dos partes diferenciadas:

- **Matriz metálica cúbica**
- **Inclusiones esféricas cerámicas**

Hay que decir que las inclusiones esféricas, en ningún momento podrán cortarse, como mucho, se les permitirá que sus fronteras se toquen, es decir, que estén en contacto unas con otras. Esto se conseguirá añadiendo la condición de que la distancia entre los centros de dos esferas sea mayor que la suma de los radios de ambas, y por lo tanto, no se intersecarán; o igual, y entonces estarán en contacto.

Este hecho condicionará fuertemente la cantidad o volumen de inclusiones que se podrán introducir dentro de la matriz cúbica, por lo que, como mucho se alcanzarán porcentajes en volumen de entre el 30 y 35%, que se calculará del modo siguiente:

$$\%_V = \frac{n_e \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_e^3}{L^3}$$

$n_e$  será entonces el número de esferas

$R_e$  será el radio de las inclusiones

$L$  será el lado del RVE

De otro modo, para llegar a porcentajes más altos se debería permitir el corte entre esferas, o permitir su superposición.

Así pues, se definirán algunos parámetros iniciales necesarios para comenzar a construir el script.

### 3.3.1. Tamaño del RVE

Aunque en posteriores apartados se estudiará la obtención del tamaño óptimo del RVE para evitar grandes errores en la toma de resultados, se hará una primera aproximación que guardará gran relación con el tamaño de las inclusiones a introducir, con el fin tanto de poder iterar para el cálculo del tamaño óptimo del RVE, como para evitar grandes tiempos de análisis durante el proceso de iteración.

Se trata de conseguir un volumen lo más pequeño posible, que represente con la mayor exactitud, el comportamiento de un modelo real a estudiar. Este tamaño, en modelos reales, dependerá de la conductividad térmica y de las características elásticas del material, así como la distribución de fuerzas y tensiones en la matriz, o la energía de la deformación media del material de estudio [10].

Para simplificar el problema, se tratará a los materiales, tanto de la matriz metálica como de las inclusiones, como si fuesen homogéneos, de forma que sus propiedades elásticas sean también homogéneas, y por lo tanto, consideraremos la isotropía de los materiales usados en el estudio del caso.

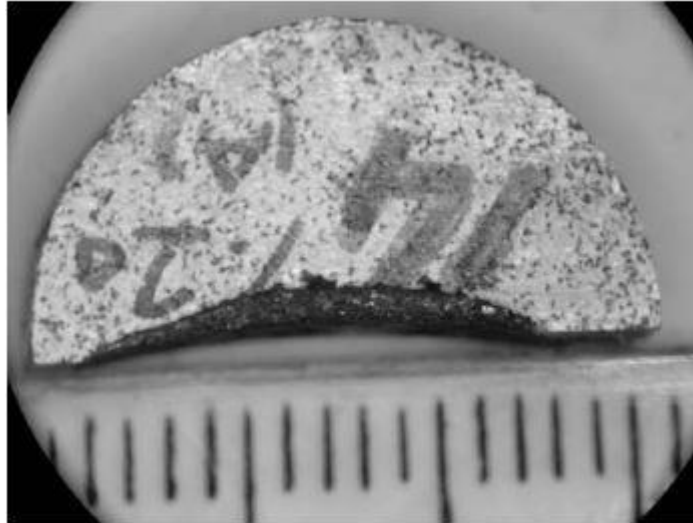
Por otro lado, las predicciones de Drugan y Willis demostraron que, teniendo una relación entre el tamaño del lado del RVE y el diámetro de las inclusiones  $L/d$  mayor que 2, se comete un error máximo del 5% en la estimación del módulo de elasticidad efectivo, y teniendo una relación de  $L/d$  mayor o igual a 4.5, solamente se comete un error del 1%, por lo tanto, se considerará una relación de alrededor de 3 para comenzar a trabajar con el problema [21].

Así que, el primer paso para conocer en primera aproximación, el tamaño de arista del RVE, deberemos conocer el tamaño que tendrán las inclusiones esféricas.

### 3.3.2. Tamaño de las inclusiones esféricas

Es difícil determinar un radio medio para las inclusiones de este tipo de cerámicos debido a que, según el modo de fabricación de los materiales, se forman fases de carburos en la matriz de material, y que más tarde, por procesos de estirado en frío, dejan de ser discontinuidades granuladas o esféricas.

Sin embargo, en ciertas literaturas podemos encontrar compuestos de matrices de aluminio con inclusiones de carburos de silicio a partir de métodos de fabricación con *spray* o *in situ*, con tamaños medios comprendidos entre 20 y 500 micras [6,9,11,21,22], aunque debido a la mayor densidad de las partículas cerámicas frente a la del aluminio, introducir altos volúmenes de material cerámico en la matriz, provocaría un aumento del peso del material, lo que quizá no sea interesante para sectores de la industria que busquen buenas propiedades mecánicas y además bajas densidades, por lo que una forma de disminuir estos volúmenes, y dotar de la mayor isotropía al material, será disminuir el tamaño de las inclusiones, por tanto, se utilizarán radios medios de unas 180 micras.



**Figura 21:** Material compuesto de aluminio AA1080 con inclusiones de SiC de tamaño 167  $\mu\text{m}$  [22]

Hay que tener en cuenta, que en modelos reales, las partículas usadas no son esferas perfectas, sin embargo, para restar complejidad al modelo numérico, se modelarán así. Por otro lado, también hay que aclarar que en modelos reales, es imposible introducir partículas del mismo tamaño en la matriz, sin embargo, si se quisiera generar inclusiones de tamaños diferentes aleatorios dentro de un rango de medida, el programa consumiría mucho tiempo en la generación de las mismas, ya que se crearían tantas esferas como inclusiones fuesen necesarias, así que, para evitar esto, se escogerá un tamaño medio y se construirá solo una esfera.

Ya conocidos los tamaños de las inclusiones, y con las conclusiones para el tamaño máximo del RVE establecidos en el apartado anterior, se calculará el tamaño de arista del cubo. Teniendo en cuenta que el diámetro de cada inclusión es de  $2 \cdot r$ , se tiene que:

$$L = 3 \cdot 0,36 = 1,08 \text{ mm}$$

Aunque para redondear esta cifra, se comenzará con un tamaño de arista de 1 mm.

### 3.4. Modelado de la estructura

El modelado se importará a través de un script en Python que automatizará el proceso tal y como se indicó anteriormente, por lo que no será necesario utilizar su interfaz gráfica (GUI) para construir el modelo en 3D, sin embargo, es preciso seguir los mismos pasos que se emplean en ella.

En siguientes puntos se explicarán los pasos seguidos en la creación del modelo según el orden utilizado en Abaqus/CAE [18,19].

#### 3.4.1. Módulo “Part”

En este módulo se modelan las geometrías de los distintos elementos del problema, y es a su vez, el primer paso a seguir durante la creación del modelo numérico.

Se definirán entonces tres elementos diferentes, sólidos tridimensionales y deformables a los que el propio programa denomina “parts”, y a los que posteriormente se dará un nombre afín a la función que desempeñarán.

##### – Cubo:

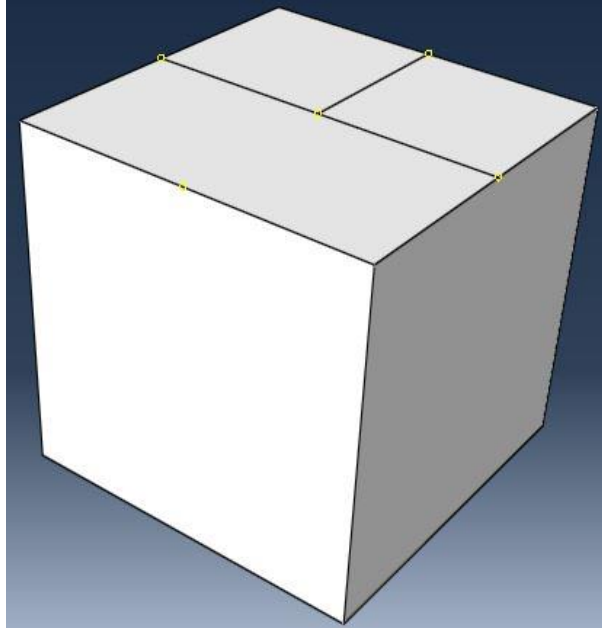
Como ya se ha comentado anteriormente, la geometría del RVE será cúbica, por lo que será totalmente necesario crear un cubo de lado “L”, y que como ya se ha visto antes, quedará definida en primera aproximación con un tamaño de 1 mm.

Para evitar entrar en el código en cada iteración durante la optimización del tamaño del RVE, al lanzar el script, aparecerá una ventana en la que se podrá cambiar el tamaño del lado cada vez que este se ejecute, con lo que se simplifica la introducción de variables al programa.

Para definir la geometría del cubo, se partirá de la creación de un boceto o “sketch”, en el que se construyen geometrías planas a partir de figuras geométricas simples tales como líneas curvas o rectas. En este caso, se realizará un cuadrado cuyo lado ya ha sido introducido.

Posteriormente, el programa permite la extrusión de la figura creada dándole la profundidad que se necesite. Aquí se le dará una profundidad igual al lado “L” con lo que se creará automáticamente un cubo.

Además, se particionará la cara superior del cubo creando así un punto central que más tarde servirá para establecer las condiciones de contorno necesarias para estudiar este caso [23].



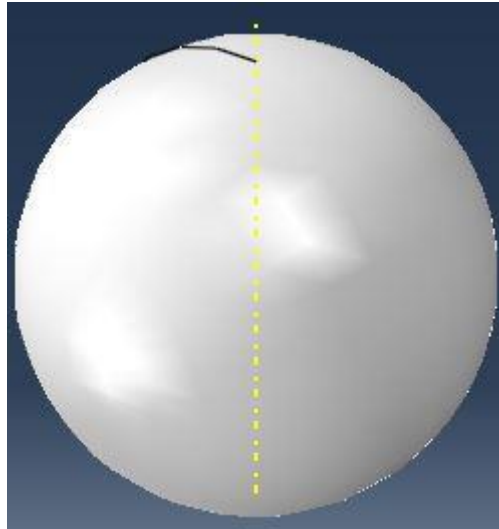
**Figura 22:** Cubo generado mediante el script en Python, y cara superior particionada

— **Esfera:**

Para introducir la geometría de las inclusiones en el programa, es necesario construir una esfera de radio “R” definido anteriormente, y que se mantendrá constante.

Se procederá del mismo modo que con el cubo: Entrando en el módulo de diseño “sketch”, o boceto, se dibujará una semiesfera con el radio “R”, y posteriormente, se extruirá la figura por revolución.



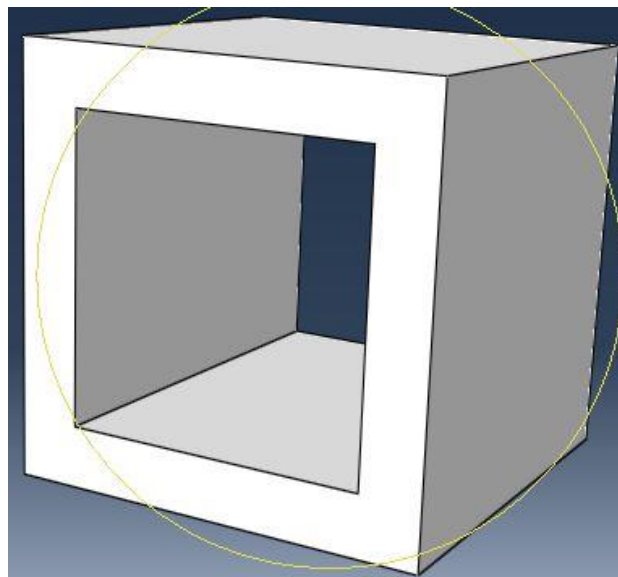


**Figura 23:** Inclusión generada mediante script en Python

– **Corte:**

Para conseguir una geometría limitada por los lados del cubo, es necesario crear un elemento al que no se le asignarán propiedades mecánicas, y que servirá únicamente para cortar la parte de las esferas que sobresalgan del RVE.

Así que, del mismo modo que se creó el cubo, entrando en “sketch”, se dibujan dos cuadrados, uno de lado “L”, y otro superpuesto al primero de lado “L+2R”, con lo que se asegurará la geometría cúbica.



**Figura 24:** Elemento o part “corte” generado mediante script en Python

### 3.4.2. Módulo “Property”

En este punto es necesario introducir las propiedades mecánicas de cada material en los elementos que se utilizarán en el problema.

Por un lado, a la matriz metálica se le asignarán las propiedades del aluminio 6061. Este tipo de aluminio es un material tratado y endurecido térmicamente, muy versátil debido a su alto contenido en silicio y magnesio. Consta de buenas propiedades mecánicas además de ser resistente a la corrosión y un material ligero, por lo que se utiliza en estructuras aéreas, construcción de yates o barcos pequeños, carrocerías de coche, etc [24].

Al ser un material muy usado en la industria, sus propiedades mecánicas son bien conocidas, por lo que escogeremos las más comunes, y estas son [25]:

- 69,5 GPa para el módulo de Young
- 0.33 para el coeficiente de Poisson
- 2,7 g/cm<sup>3</sup> para la densidad del material

Por otro lado, tenemos las inclusiones que constituirán el refuerzo para la matriz metálica. De igual modo que con el aluminio, el carburo de silicio es muy utilizado en la industria por la buena relación de sus propiedades mecánicas con su baja densidad, y gran dureza entre otras, por lo que es muy útil en aplicaciones tales como en la construcción de turbinas, intercambiadores de calor y un largo etcétera.

Así pues, no es difícil encontrar sus propiedades mecánicas en la literatura [26]:

- 410 GPa para el módulo de Young
- 0.14 para el coeficiente de Poisson
- 3.1 g/cm<sup>3</sup> para la densidad del material

Por lo tanto, quedan establecidas las propiedades que han de tener estos dos elementos, además, hay que tener de nuevo en cuenta que a la part “corte” no se le asignará ningún tipo de material tal y como se explicó anteriormente.

### 3.4.3. Módulo “Assembly”

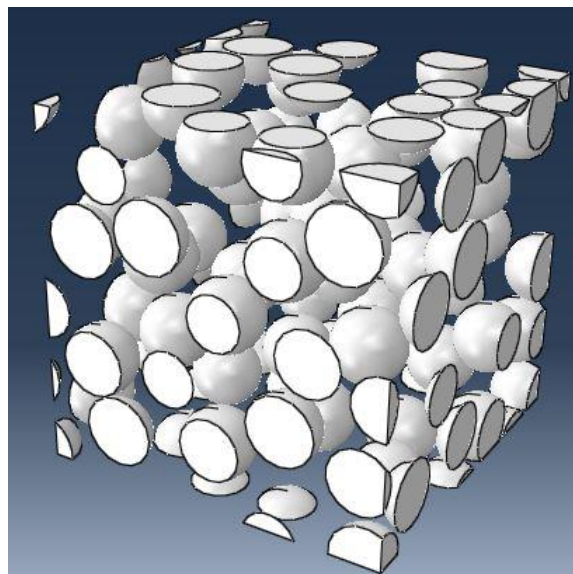
Al asignar las propiedades de cada material a cada elemento y después introducir las esferas dentro del RVE, el programa considerará que la parte interior de las inclusiones que

sobresalgan del cubo serán parte de la matriz metálica, y no del material de refuerzo, por lo que se procederá del siguiente modo.

Gracias al código construido, se generará una lista de posiciones aleatorias y se comprobará que en ningún caso, las inclusiones lleguen a cortarse. Además, si se encuentra una esfera que corta con las fronteras del cubo, automáticamente el programa generará otra esfera que corte la cara opuesta, y que se alejará de la original a una distancia “L” en dirección perpendicular a la superficie de la cara cortada. Esta técnica se conoce como “condiciones de contorno periódicas”.

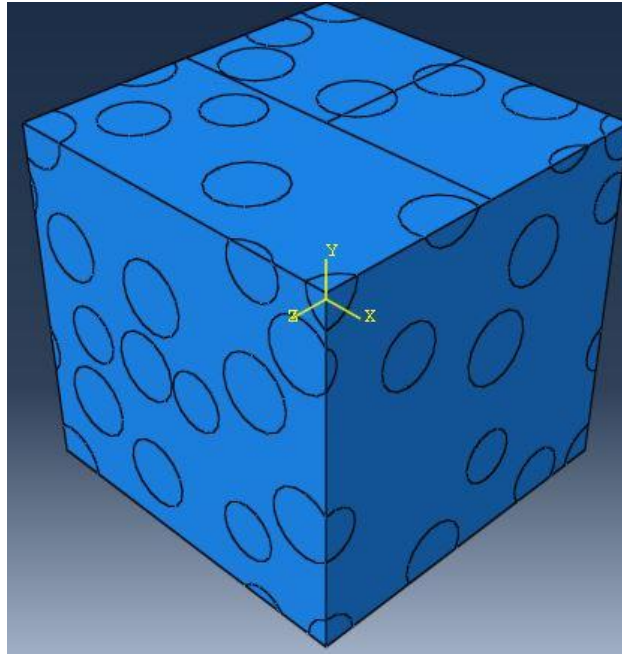
Esta técnica se utiliza cuando se quiere estudiar una pequeña región finita de un conjunto mucho más amplio, al que se suele considerar infinito o muy grande, de celdas idénticas. Existen más tipos de condiciones de contorno, como pueden ser las de condiciones de contorno libres, utilizadas para simular gases o fluidos, de contorno rígido, las mixtas, etc [27]. Sin embargo, si lo que se pretende es estudiar el efecto que tienen todas las inclusiones, no sólo con la frontera del RVE, sino también con sus imágenes periódicas, es decir, eliminar el efecto superficie, o simular que el sistema no tiene superficie, entonces es necesario la aplicación de este tipo de condiciones periódicas [20,28]. De tal modo que si se colocase otro cubo idéntico a continuación del ya creado, habría esferas completas en el interior de este nuevo sistema ampliado.

Cuando todas las esferas estén situadas en sus posiciones correspondientes, se cortarán con la part “corte” antes generado, y se creará un “set”, o conjunto de esferas que se utilizará después para la asignación de propiedades del material escogido.



**Figura 25:** conjunto de esferas después de ser cortadas para un porcentaje en volumen del 25%

Después de esto, sólo será necesario introducir este conjunto o “set” en el interior del cubo, con lo que se creará el RVE del material.



**Figura 26:** RVE generado en Abaqus/CAE para un 20% de inclusiones en volumen

#### 3.4.4. Módulo “Step”

En este módulo es necesario decirle a Abaqus el tipo de análisis que se va a realizar, que en este caso será estático, y el tiempo de simulación, que se establecerá como 100 segundos.

Debido a que el estudio será estático, el tiempo de simulación no afectará a los resultados obtenidos ya que las variables de estudio no varían con el tiempo, por lo que el valor establecido será más que suficiente para una buena toma de resultados. Sin embargo, con objeto de permitir al programa un cálculo iterativo hasta converger a la solución, para evitar en la medida de lo posible los errores que puedan surgir durante el análisis, se impondrán incrementos de 1 en 1 hasta la solución del problema.

Así mismo, hay que pedirle a Abaqus las variables que entrarán en juego en el análisis, ya sea la tensión de Von Mises, desplazamientos, masa del conjunto o reacciones en los nodos.

### 3.4.5. Módulo “Load”

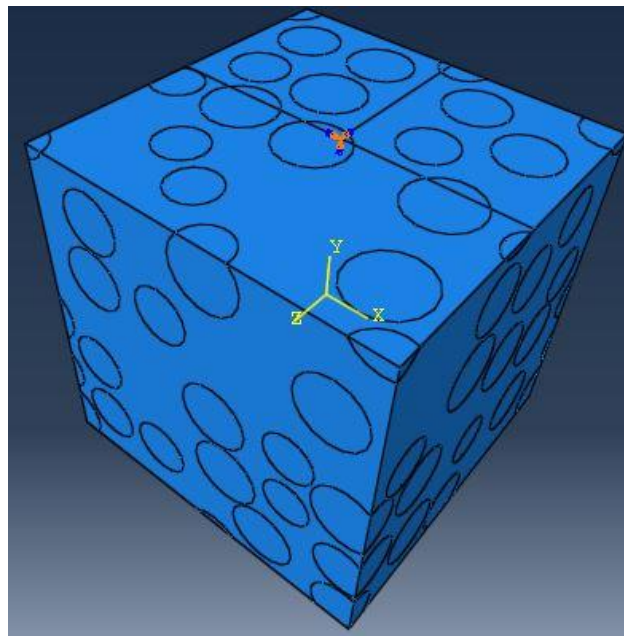
Una vez generada la estructura, será necesario establecer las condiciones de contorno o acciones sobre la estructura que se llevarán a cabo para conocer las propiedades mecánicas de este nuevo material.

Se le aplicarán las siguientes condiciones:

- **Empotramiento** o encastre

Se le asignará una restricción de movimiento a un punto central de la cara superior del RVE de tal modo que los desplazamientos en las tres direcciones principales, y los giros estén totalmente impedidos, con lo que se le restan 6 grados de libertad al problema.

El programa Abaqus/CAE designa este tipo especial de restricción como “encastre”. De este modo se consigue que el RVE quede fijado en el espacio, sin embargo, el hecho de aplicarlo sólo en un punto servirá para conseguir unas condiciones de contorno periódicas, ya que de otro modo, se le impediría la continuidad espacial a partir de esa cara, es decir, las esferas de la cara superior no interactuarían con sus imágenes.

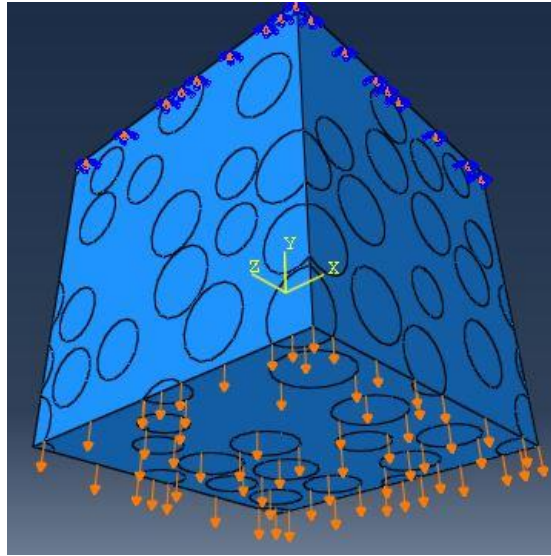


**Figura 27:** Encastre en el punto medio de la cara superior del RVE

### – Desplazamiento

En la cara inferior del cubo, exactamente la opuesta de la que se ha situado el empotramiento, se fijará un desplazamiento negativo en dirección perpendicular a la superficie de la cara, de tal modo que el RVE esté traccionado.

Este valor de desplazamiento será proporcional al tamaño del lado “L” de tal modo que tendrá un valor del 5% del tamaño de éste.



**Figura 28:** Desplazamiento vertical en la cara inferior del RVE

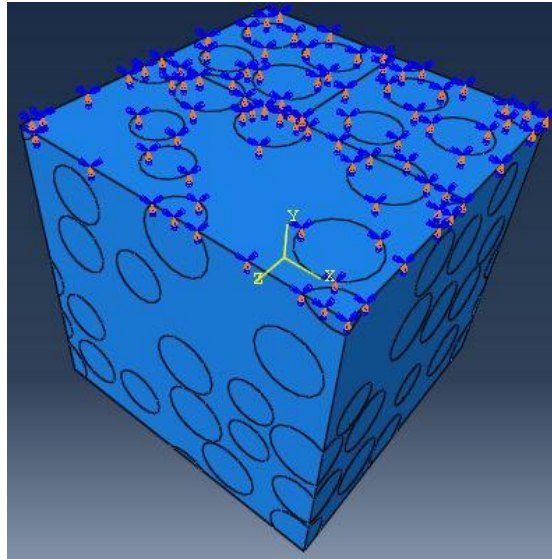
### – Restricción de movimiento

En la cara superior, en el mismo lugar en el que se fijó el “encastre”, se le asignará la restricción de desplazamiento vertical a toda la cara superior.

Con esto se consiguen dos cosas:

- La primera de ellas, se inducirá al material a que haga un ejercicio únicamente de tracción, provocando el desplazamiento perpendicular a la dirección de traccionado, lo que creará una reducción de área simulando un ensayo real.
- La segunda, evitará que el RVE tenga un desplazamiento vertical positivo, lo que implicaría que el material se introduciría dentro de la siguiente celdilla unidad si ésta se colocase en la cara superior, de tal modo que se superpondrían los materiales de uno y otro RVE, cosa que sería físicamente imposible.

Al no especificar ninguna restricción más, el resto de direcciones quedarán libres.

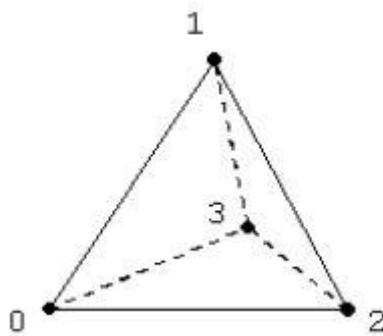


**Figura 29:** Restricción del desplazamiento vertical en la cara superior del RVE

#### 3.4.6. Módulo “Mesh”

Tras haber seguido todos los pasos anteriores, lo único que queda es mallar el conjunto generado para hacer el cálculo por elementos finitos, de modo que se subdividirá la región creada en pequeños elementos de geometría conocida y de tamaño también conocido el cual será establecido por el usuario.

Como el caso de este proyecto es una simulación en tres dimensiones, Abaqus/CAE pone a disposición del usuario una serie de geometrías para discretizar el modelo, una de las cuales, por defecto, es la tetraédrica, y será la utilizada en este caso.

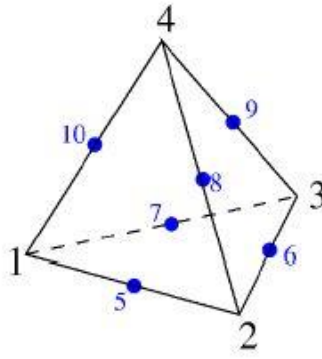


**Figura 30:** Elemento tetraédrico de 4 nodos

Sin embargo, el elemento tetraédrico por defecto es un elemento muy rígido, ya que contiene solamente un nodo por cada vértice, por lo que implica el uso de funciones de interpolación de grado 1 (lineales), por lo que el cálculo del desplazamiento del elemento queda muy limitado.

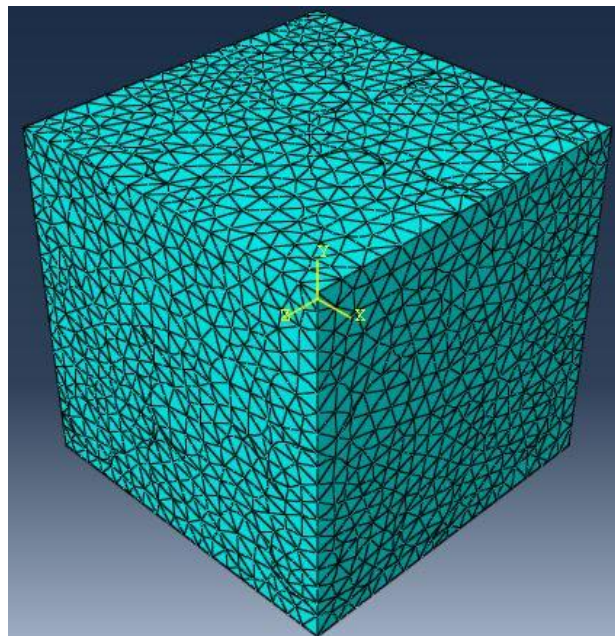


Así pues, será necesario utilizar el siguiente elemento tetraédrico que dispone el programa. Este tendrá 10 nodos en lugar de 4, donde los otros 6 se situarán en medio de cada arista del elemento tetraédrico, por lo que será más fácil aproximar el desplazamiento del elemento ya que el resultado será más preciso [29].



**Figura 31:** Elemento tetraédrico de 10 nodos

Una vez escogidos los elementos que el programa usará para discretizar el conjunto o dominio, será necesario introducir el tamaño del elemento. Este tamaño quedará definido por el usuario nada más lanzar el script, aunque será necesario realizar un análisis de refinamiento de malla para optimizar dicho tamaño para dotar de precisión a los resultados obtenidos.



**Figura 32:** Mallado del RVE con tamaño de elemento de 0.1 mm para un 35% de inclusiones



### 3.5. Análisis de sensibilidad

#### 3.5.1 Análisis de sensibilidad del mallado

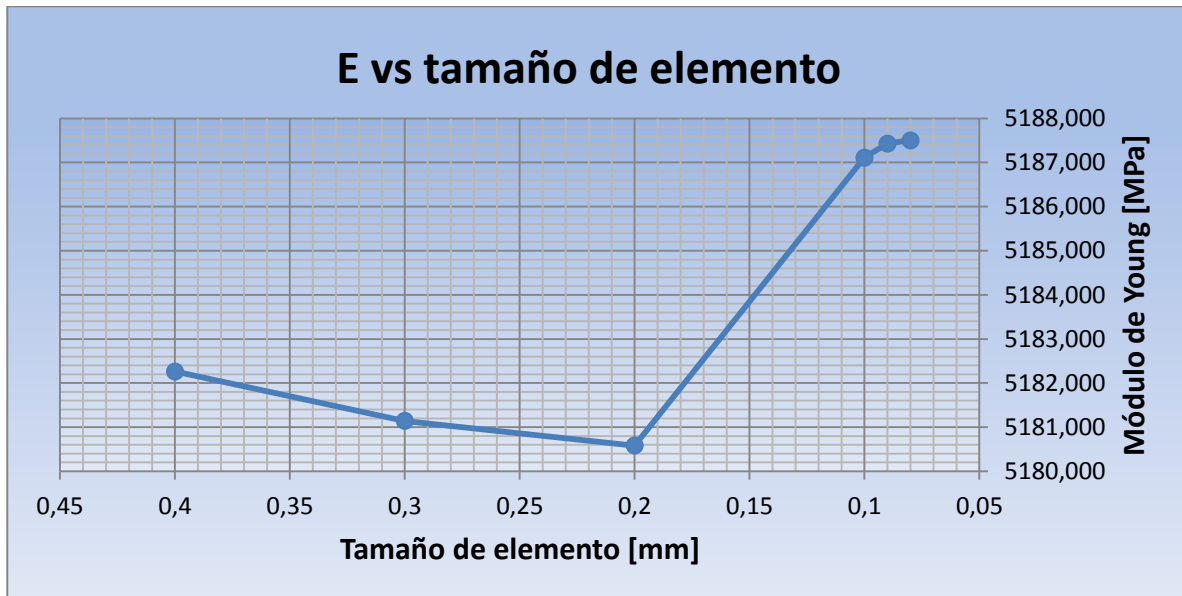
Como ya se ha subrayado en apartados anteriores, con el fin último de obtener una buena toma de resultados precisos, será necesario discretizar el conjunto de manera que haya el máximo número de nodos, y por lo tanto, mayor información para el cálculo del campo de desplazamientos, en cuyo caso el sistema de ecuaciones a resolver será mucho mayor cuanto mayor sea el número de nodos que tenga el sistema. Sin embargo, se trata de minimizar el tiempo de cálculo y el número de recursos del sistema informático sin que esto afecte en gran medida a los resultados obtenidos.

Así pues, Abaqus/CAE dispone de herramientas de las que cualquier usuario puede servirse, que le permiten por ejemplo, determinar el tamaño de los elementos seleccionados que discretizarán el dominio, de modo que a mayor tamaño de elemento, menor número de nodos tendrá el sistema, lo que se traduciría en una disminución de la precisión de los resultados.

De modo que para estudiar cómo varían los datos obtenidos según el tamaño de elemento seleccionado, se lanzará el mismo caso con diferentes mallados, y se observará la variación del módulo de Young, o módulo de elasticidad en los diferentes casos. Por ejemplo, el modelo escogido será un RVE con un porcentaje de volumen de inclusiones del 25%.

Se espera poder observar la zona en la cual se estabilicen los resultados, y se escogerá un mallado de tal manera que el error de cálculo sea mínimo con un tiempo de análisis lo más bajo posible. Esto es, se escogerá un valor el cual se considerará ofrece una toma de datos muy precisos, con este valor se supondrá un error de alrededor del 0%. Este valor de referencia será de 80 micras, sin embargo, el tiempo de cálculo será excesivamente alto.

Como podrá observarse, el valor del módulo de Young fluctuará con los diferentes tamaños de malla, sin embargo, a partir de un tamaño de 100 micras, éste comienza a estabilizarse hasta el valor de referencia escogido, hecho que se observa mejor en la siguiente gráfica:



**Figura 33:** Variación del módulo de Young [MPa] frente a los diferentes tamaños de malla [mm]

Por lo tanto, y a la vista de los resultados, el tamaño de malla deseado sería, sin lugar a dudas, 80 micras, sin embargo, debido a la potencia del sistema informático con el que se han hecho los cálculos, para el mallado de referencia y el siguiente en la lista (90 micras) los tiempos de análisis varían entre 30 minutos y 1 hora, por lo que irremediablemente se ha debido escoger un tamaño de 100 micras, que aunque no ofrece unos resultados tan buenos, no resultan tan alejados del valor de referencia escogido, luego entonces, este será el mallado utilizado en los sucesivos cálculos.

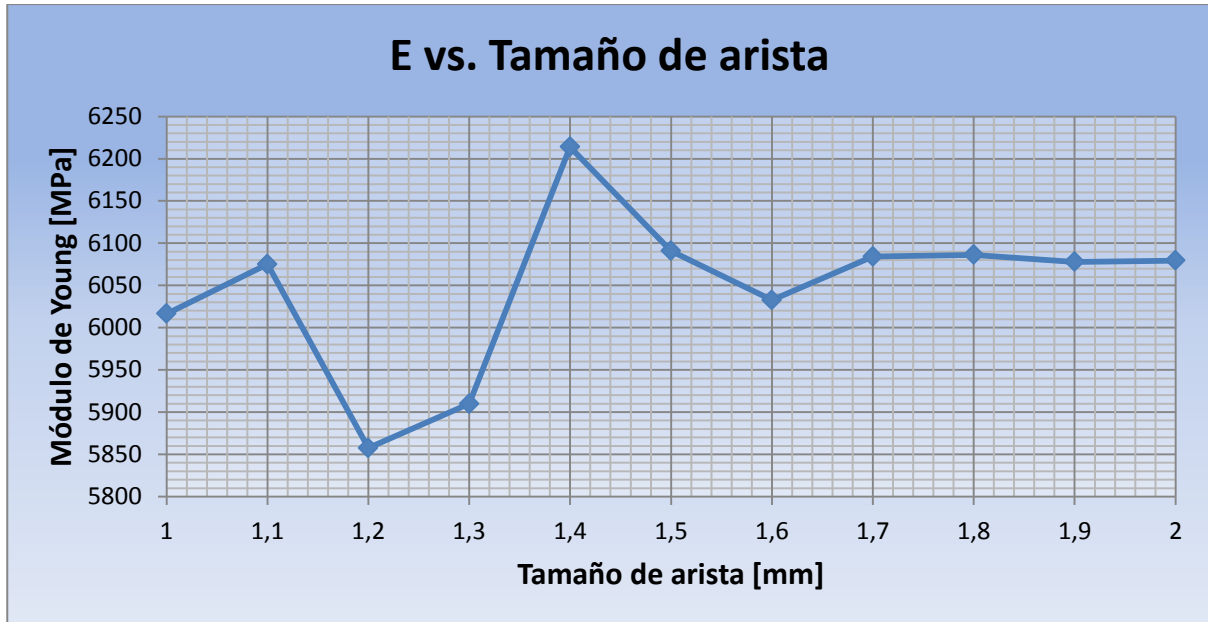
### 3.5.2 Análisis de sensibilidad del tamaño del RVE

Ya se justificó anteriormente que en primera aproximación, y como manera primera para comenzar con las iteraciones en la búsqueda del tamaño del RVE óptimo, la medida de la arista del cubo sería de 1 mm.

Así que de la misma forma que en el punto anterior, y con fin último de dotar a los resultados de la mayor precisión posible, se lanzarán diferentes casos con la mayor cantidad de inclusiones posibles, variando siempre el tamaño de arista del cubo. Más tarde, se calculará el módulo de elasticidad resultante y se observará su variación frente al tamaño de arista del RVE, lo que permitirá obtener el tamaño óptimo de éste.

Para determinar claramente estas variaciones del módulo de Young, se tendrá siempre un porcentaje en volumen de inclusiones del 35%, y se aumentará el tamaño de arista en incrementos de 0.1, desde 1 hasta 2 mm.

De nuevo, se esperará poder observar la zona en la cual se estabilicen los resultados. Para apreciar bien estos datos, los analizaremos gráficamente:



**Figura 34:** Gráfica que representa la variación del módulo de Young [MPa] frente al tamaño de arista del RVE [mm] hasta su convergencia

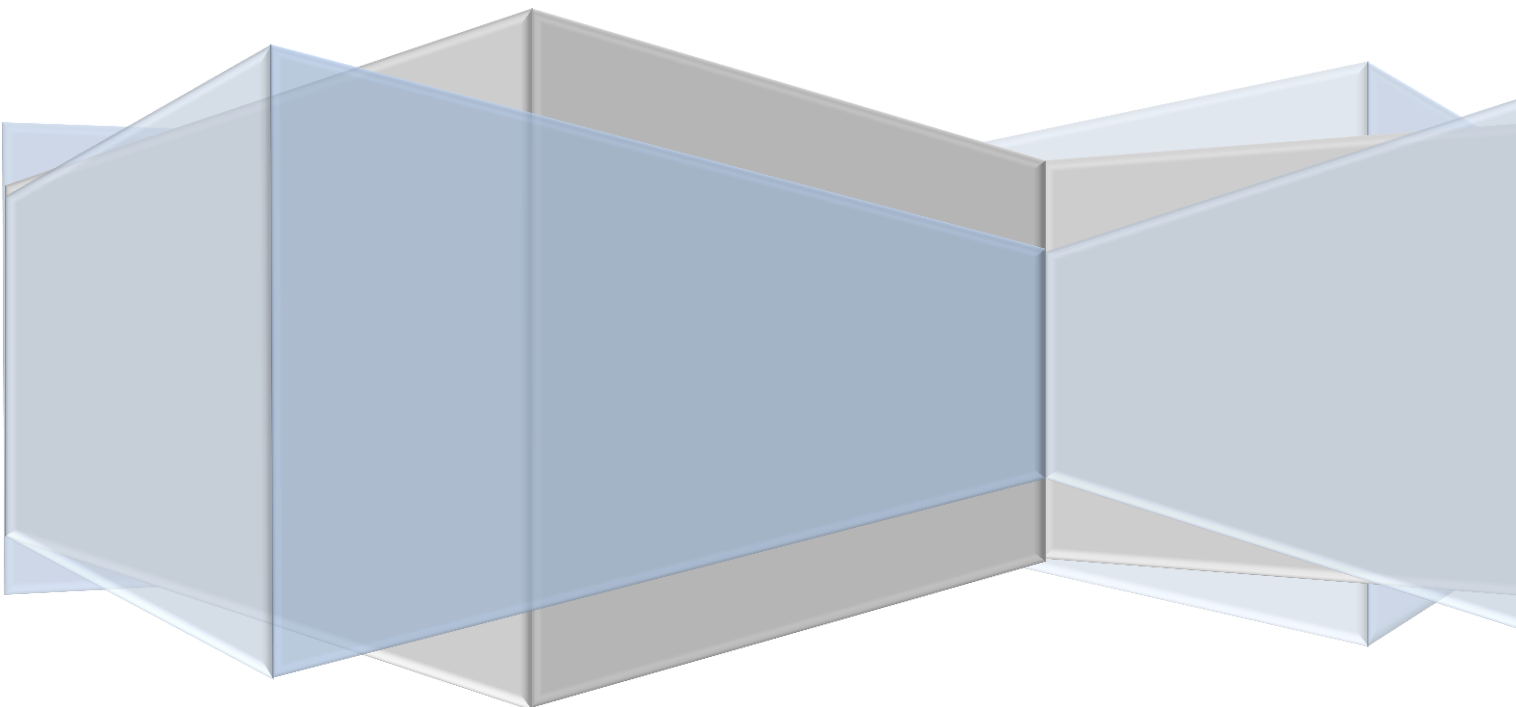
Como se puede observar, para tamaños comprendidos entre 1 y 1.7 mm, los valores del módulo de elasticidad fluctúan demasiado, por lo que no se pueden dar por válidos valores comprendidos en ese intervalo. Sin embargo, a partir de 1.8, estos se estabilizan, y por lo tanto en esa zona se encuentra la región de mayor interés.

Así pues, si escogemos tamaños superiores a 1.8 mm, el número de inclusiones aumenta, por lo que los tiempos de análisis cada vez se hacen mayores debido al aumento de nodos, por lo tanto, el valor que se fijará como medida última de arista será de 1.8 mm.

Puesto que a partir de 1.7, la región puede aproximarse por una recta con un error pequeño, y además, como ya se dijo anteriormente, es necesario un ratio  $L/d$  de 4.5, siendo el actual de 5, estamos asegurando la precisión en los resultados, siendo estos extrapolables a cualquier material que presente esta estructura.

# Capítulo 4:

## Problema a resolver



Tal y como se ha venido viendo hasta ahora, la razón de este proyecto es la de estudiar las propiedades mecánicas del material compuesto frente al volumen de inclusiones introducido en la matriz continua de aluminio.

Gracias a la construcción del script que automatiza el proceso de diseño y generación, análisis y visualización de resultados del modelo en 3D necesario para recrear por ordenador el material compuesto escogido, lo único que se le exigirá al usuario serán tres variables:

- Volumen de inclusiones en tanto por uno, necesario para estudiar el comportamiento mecánico que sufrirá el material frente a dicho volumen.
- Tamaño de arista del RVE: aunque éste tamaño se mantendrá fijo una vez hecho el correspondiente estudio de la sensibilidad, para evitar entrar en el código en cada etapa de la iteración de dicho análisis, lo que entorpecería el desarrollo del proyecto, se añade esta entrada que habrá que definir el usuario.
- Tamaño de elemento del mallado: del mismo modo que para el tamaño de arista, este se mantendrá fijo una vez hecho el estudio de sensibilidad, sin embargo, y por el mismo motivo que por el anterior, se añade esta entrada a definir por el usuario.

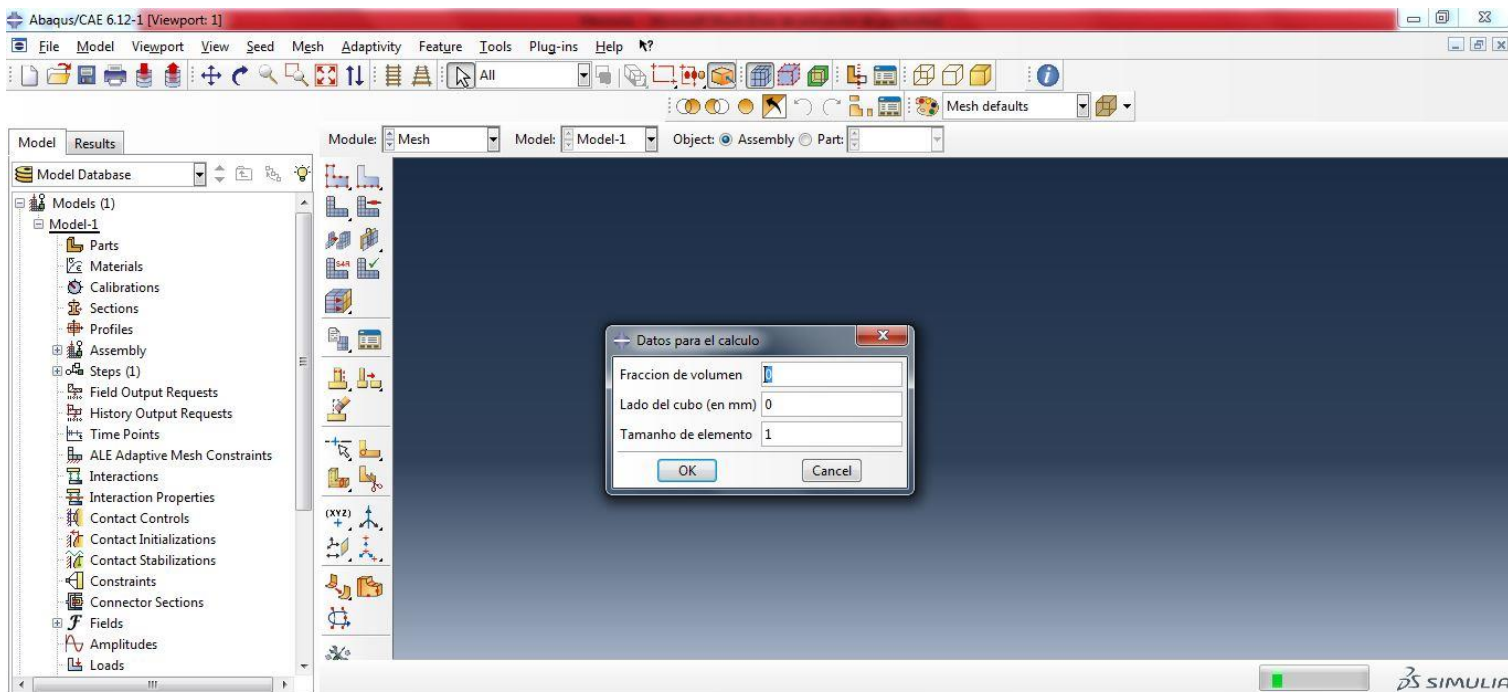


Figura 35: Interfaz de Abaqus/CAE con los parámetros a definir por el usuario

Aunque todas las dimensiones y propiedades de los materiales y elementos del conjunto numérico han sido ya definidas, se realizará un pequeño recordatorio:

**Tabla 2:** Constantes fijadas para la resolución del problema [25,26]

Aluminio 6061			SiC		
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo de Young (GPa)	Coef. Poisson	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo de Young (GPa)	Coef. Poisson
2,7	69,5	0,33	3,1	410	0,14
Tamaño arista RVE(mm)	1,8				
Tamaño elemento malla (mm)	0,1				
Radio de las inclusiones (mm)	0.18				

Además, también es conveniente recordar las condiciones a las que está sometido el conjunto:

– **Empotramiento o encastre:**

Se le asignará una restricción de movimiento a un punto central de la cara superior del RVE de tal modo que los desplazamientos en las tres direcciones principales, y los giros estén totalmente impedidos.

– **Desplazamiento vertical**

En la cara inferior del cubo, exactamente la opuesta de la que se ha situado el empotramiento, se fijará un desplazamiento negativo en dirección perpendicular a la superficie de la cara de un valor del 5% del tamaño de la arista, de tal modo que el RVE esté traccionado.

– **Restricción de movimiento**

En la cara superior, en el mismo lugar en el que se fijó el “encastre”, se le asignará la restricción de desplazamiento vertical a toda la cara superior.

Estas condiciones a las que estará sometido el RVE proporcionarán las tres propiedades mecánicas objeto de estudio de este proyecto, como son el módulo de Young (E), módulo de Cizalla o cortadura (G), y coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), sin embargo, el programa no proporciona directamente estos valores, por lo que habrá que especificar la forma de calcularlos. Así pues, también será interesante ver la variación de la densidad del material en función del porcentaje de inclusiones.

– **Módulo de Young (E):**

Se debe recordar que el material será tratado como un material isótropo, elástico y lineal, sin embargo, debido a la acumulación de inclusiones en diferentes zonas de la matriz, este no es en absoluto isótropo, sino que sus propiedades variarán en función de la zona y la dirección del material a estudiar.

De modo que para calcular el valor de este módulo de elasticidad en una dirección, será necesario seguir la ley de Hooke, la cual establece que la deformación de un material en una dirección del espacio es proporcional a la fuerza por unidad de área aplicada, esto es:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

Donde:

- $\varepsilon$  será la deformación del material en la dirección principal
- $\sigma$  será la fuerza por unidad de superficie o tensión en la misma dirección principal de la deformación [Pa]
- $E$  será el módulo de elasticidad del material en la misma dirección de la deformación [Pa]

Así que, para calcular este módulo de elasticidad, será necesario conocer, por un lado, la deformación aplicada, y por otro lado, la tensión ligada a esa deformación.

Para el cálculo de la deformación, disponemos de cierta información que por defecto anteriormente hemos establecido, de tal manera que el desplazamiento vertical de la cara inferior de cubo tiene que ser de un 5% del tamaño de la arista. Esta deformación expresa el desplazamiento por unidad de longitud sufrido por el material como resultado de imponer un campo de tensiones o de desplazamientos al mismo, esto es:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

- Donde  $\Delta L$  será el desplazamiento sufrido por el material [mm]
- $L$  el tamaño de la arista del RVE [mm]

Si tenemos que  $\Delta L$  será  $0.05 * L$ , entonces la deformación resultante será de 0.05.

Así mismo, Abaqus/CAE no ofrece la posibilidad de obtener el campo de tensiones del modelo de manera directa, pero por otro lado sí que se le puede exigir el cálculo de las reacciones de los nodos de la cara superior en la que se ha establecido la restricción de movimiento vertical. De modo que se procede de la siguiente manera para calcular el campo de tensiones en la dirección del desplazamiento vertical:

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{A}$$

Donde:

- $R_i$  será la reacción vertical del nodo  $i$  de la cara superior del cubo [KN].
- $A$  será el área de la sección transversal antes del comienzo de la deformación del cubo [mm<sup>2</sup>].

De modo que aplicando la ley de Hooke se puede conocer el módulo de Young global del RVE y con las unidades coherentes seleccionadas, quedará directamente en gigapascas.

– **Coefficiente de Poisson ( $\nu$ ):**

Esta propiedad del material permite conocer la relación que hay entre el desplazamiento transversal del material cuando se aplica un campo de tensiones perpendicular a la sección transversal del mismo. Esta relación, que también se contempla en la ley de Hooke, es el ratio entre la elongación transversal frente a la longitudinal del material.

Como se debe recordar, el problema se trata como un material isótropo, lineal y elástico, lo que quiere decir que no presenta anisotropía, es decir, que sus propiedades no variarán en función de la dirección principal que se estudie. Esta simplificación se realizará, al igual que para la obtención del resto de propiedades, para restar complejidad al problema.

Para realizar estos cálculos, se debe proceder de manera diferente a como se hizo para la obtención del módulo de elasticidad.

Lo primero, será conocer la deformación longitudinal. Esta ya es conocida puesto que se determinó para la obtención del módulo de Young, y es 0.05, de modo que será necesario calcular únicamente la transversal.



Para ello se utilizará el mismo modelo utilizado en la obtención del módulo de elasticidad, pero en este caso, se observará el desplazamiento en la dirección horizontal del cubo, de tal manera que la deformación transversal se calculará de la siguiente manera:

$$U_x^- = \frac{\sum_{i=1}^n u_{x_i}^-}{n}$$

$$U_x^+ = \frac{\sum_{i=1}^n u_{x_i}^+}{n}$$

$$\varepsilon_{long} = \frac{U_x^- - U_x^+}{L}$$

Donde:

- $U_x^-$  será el desplazamiento horizontal de la cara lateral izquierda en sentido positivo del eje x [mm].
- $U_x^+$  será el desplazamiento horizontal de la cara lateral derecha en sentido negativo del eje x [mm].
- $u_{x_i}^-$  será el desplazamiento horizontal del nodo  $i$  de la cara lateral izquierda en sentido positivo del eje x [mm].
- $u_{x_i}^+$  será el desplazamiento horizontal del nodo  $i$  de la cara lateral derecha en sentido negativo del eje x [mm].
- $n$  será el número de nodos de la cara derecha o izquierda respectivamente.
- $L$  será el tamaño de la arista del RVE [mm].

Una vez obtenida la deformación transversal, el coeficiente de Poisson podrá calcularse del siguiente modo:

$$\nu = \frac{|\varepsilon_{transversal}|}{|\varepsilon_{longitudinal}|}$$

#### — Módulo de cizalladura (G):

Una vez calculados tanto el módulo de elasticidad como el coeficiente de Poisson, será también necesario obtener el módulo de cortadura. Éste establece la relación entre el campo de tensiones aplicado en dirección paralela a la sección transversal del cuerpo con su deformación transversal, luego esta medida proporciona el conocimiento del cambio de geometría generado en el cuerpo en lugar del cambio de volumen, como sí que expresan las otras dos propiedades mecánicas.

Esta propiedad elástica también fue enumerada por Robert Hooke expresándose de la siguiente manera:

$$\tau = G * \gamma$$

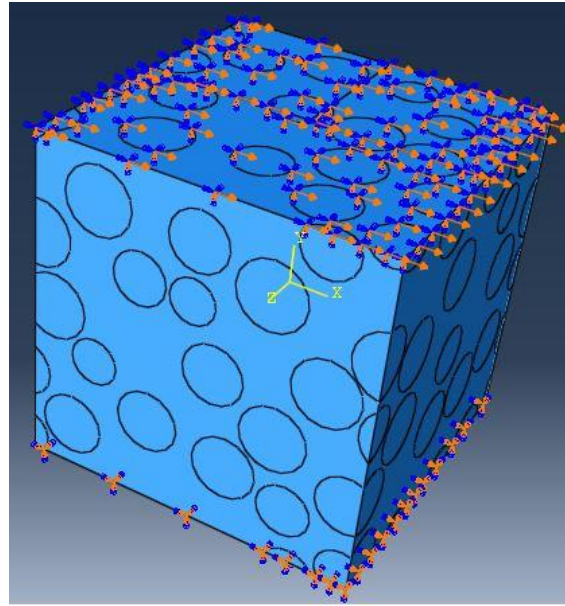
Donde:

- $\tau$  será la tensión tangencial aplicada en dirección paralela a la sección transversal del cuerpo [Pa].
- $G$  será el módulo de cortadura del material [Pa].
- $\gamma$  será la deformación angular que sufre el material con respecto a un plano perpendicular a la dirección de aplicación del campo de tensiones [rad].

De modo que para obtener estos datos, será necesario cambiar las condiciones de contorno aplicadas en el RVE una vez lanzado el script.

Una vez hecho el primer análisis por el cual se calculan los módulos de elasticidad y coeficiente de Poisson, habrá que regresar al módulo “Load”, donde se variarán las condiciones necesarias para el siguiente análisis:

- Se eliminará el encastre de la cara superior del cubo y se establecerá un desplazamiento del 5% del tamaño de la arista en dirección horizontal.
- Se empotrará la cara inferior del cubo de tal manera que se restringirá el movimiento y giro de toda esta superficie.
- Se mantendrá la restricción de movimiento vertical de la cara superior del RVE para establecer un estado de cortadura pura.



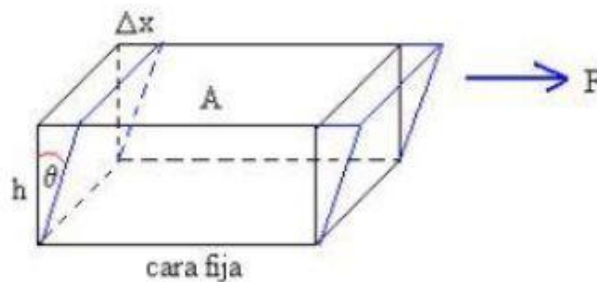
**Figura 36:** Condiciones de contorno sobre el RVE para el cálculo del módulo de cortadura para un 30% de inclusiones en volumen

Hecho esto, se relanzará el modelo numérico y se calcularán los parámetros de tensión y deformación angular del siguiente modo, teniendo en cuenta pequeños desplazamientos, ya que de otro modo, deberían usarse modelos diferentes a la ley de Hooke como hasta ahora se viene haciendo [30]:

$$\gamma \approx \tan(\gamma) = \frac{\max(U_{x_i})}{L}$$

Donde:

- $U_{x_i}$  será el desplazamiento máximo del nodo  $i$  situado en la cara lateral izquierda en la dirección de aplicación del campo de desplazamientos [mm].
- $L$  será el tamaño de la arista del RVE [mm].



**Figura 37:** Ensayo para la obtención del módulo de cortadura [30]

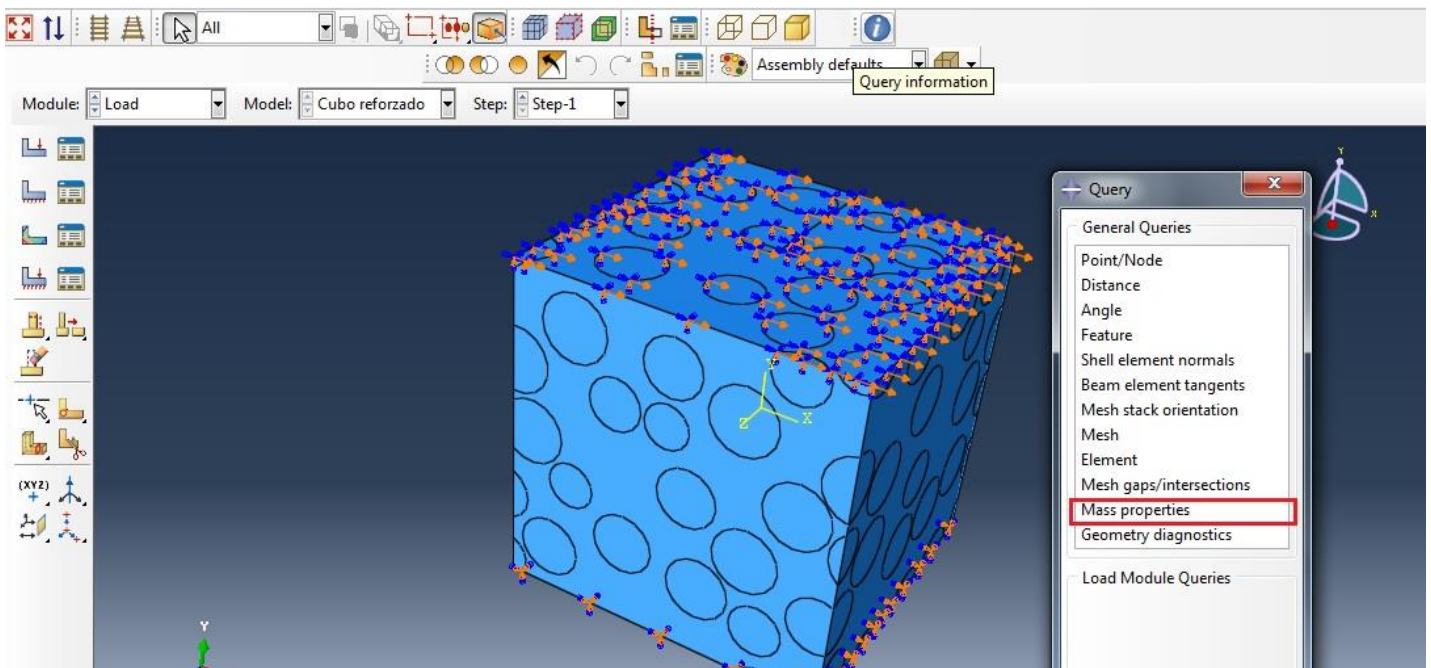
Ambos datos serán conocidos ya que han sido previamente definidos por el usuario, siendo  $U_{x_i} = 0.05 * L$ , por lo tanto, la deformación angular será también de 0.05.

Así pues, faltaría determinar la tensión tangencial, que se realizará del mismo modo que para el módulo de Young. Se calcularán las reacciones horizontales en la cara inferior (encastre) y se obtendrá la tensión recurriendo al mismo método que el antes propuesto.

– **Densidad:**

El programa Abaqus/CAE no ofrece la posibilidad de conseguir directamente la densidad del material, sin embargo, sí que es posible su cálculo realizando unos sencillos pasos que se explicarán a continuación:

- Una vez se le han establecido las propiedades a los diferentes materiales y se ha ensamblado el conjunto, tras generar el modelo, se accede de nuevo al módulo “Property” y se selecciona la part “MMC”.
- Se pincha en el asistente de ayuda que ofrece Abaqus/CAE en su interfaz gráfica “Query information” y se selecciona “Mass properties”



**Figura 38:** Ayuda de la interfaz gráfica (GUI) de Abaqus/CAE para el cálculo de la densidad del material

Con estos pasos, el programa proporciona una biblioteca de datos de donde seleccionaremos el volumen, que en este caso será una constante de valor  $5.83 \text{ [mm}^3\text{]}$ ,

y la masa del conjunto [Kg], que en este caso irá variando a medida que aumenten las inclusiones de material.

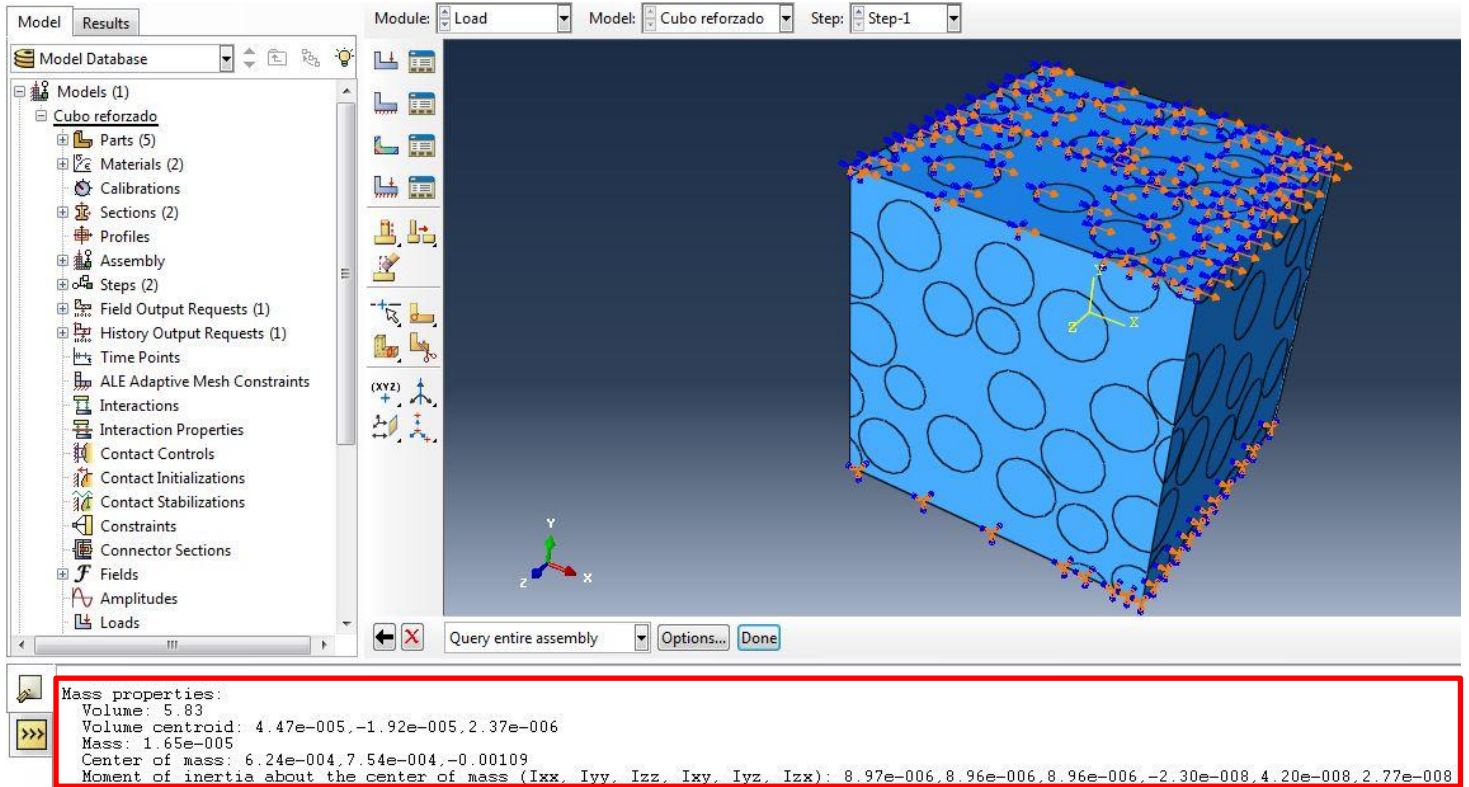


Figura 39: Biblioteca de datos para el cálculo de la densidad del material

Por lo tanto, para obtener la densidad del material solo será necesario calcularlo del siguiente modo:

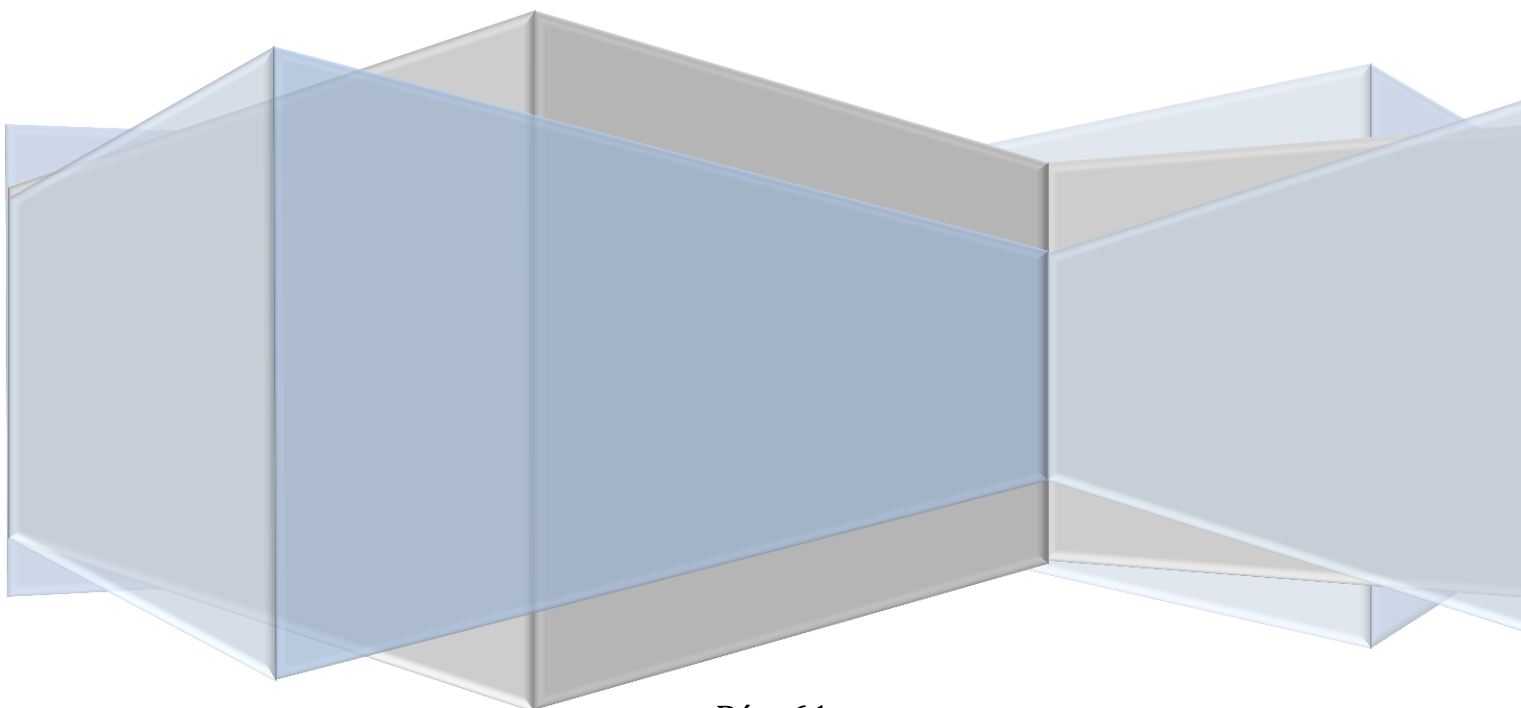
$$d = \frac{m}{V}$$

Una vez propuesta la manera en que se obtendrán las propiedades elásticas del material, es necesario indicar que la toma de resultados se hará cambiando el volumen de inclusiones en la matriz metálica, de tal modo que se irán calculando desde un porcentaje del 0% hasta un 35%, valor máximo alcanzado durante la generación del RVE, variando este porcentaje de 5 en 5, realizando tres análisis diferentes con diferentes modelos con el mismo porcentaje de inclusiones, con lo que se acotará el error y se intentará calcular la tendencia seguida por los resultados.



# Capítulo 5:

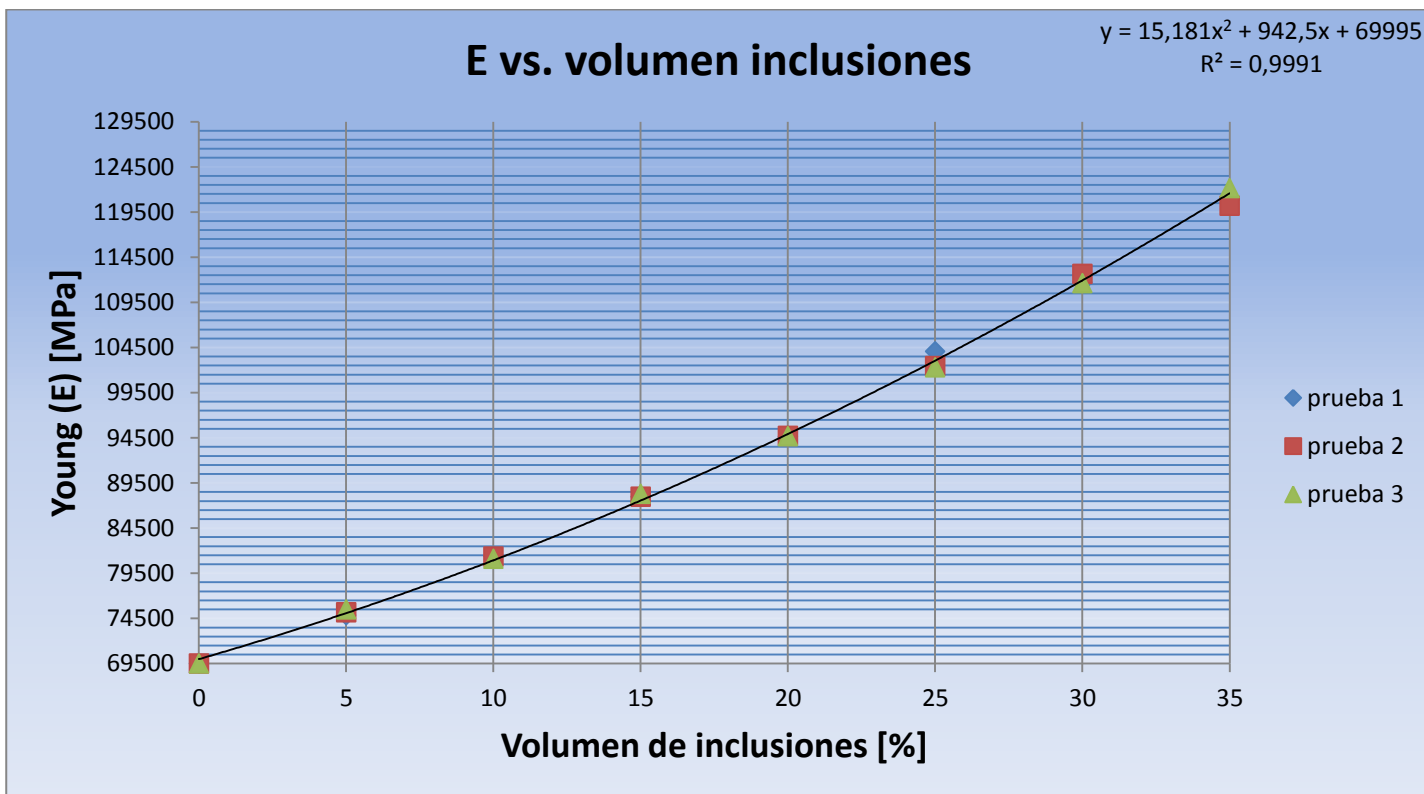
## Resultados



En esta sección, se reflejarán los resultados obtenidos para las distintas propiedades mecánicas, aplicando las condiciones definidas en la sección anterior del presente documento.

### 5.1. Módulo de elasticidad (E)

Se procederá a presentar la variación sufrida por el módulo de Young [MPa] frente al nivel de inclusiones [%] generado en la matriz del material, de tal modo que quedará representado en una gráfica desde la cual se analizarán los resultados y se estudiará su tendencia, si es que ha de tenerla.



**Figura 40:** Gráfica que representa la variación del módulo de Young [MPa] frente al volumen de inclusiones de SiC en la matriz de aluminio 6061

Como puede apreciarse en la gráfica, el valor del módulo de elasticidad para un 0% de inclusiones coincide con el valor introducido para el material que formará la matriz, esto es 69,5 GPa.

Así mismo, se observa un aumento progresivo de la resistencia del material a medida que aumenta el volumen de inclusiones en la matriz, aproximándose este incremento a una curva polinómica de grado 2, llegando incluso a incrementarse hasta 1.74 veces frente a una matriz sin refuerzo.

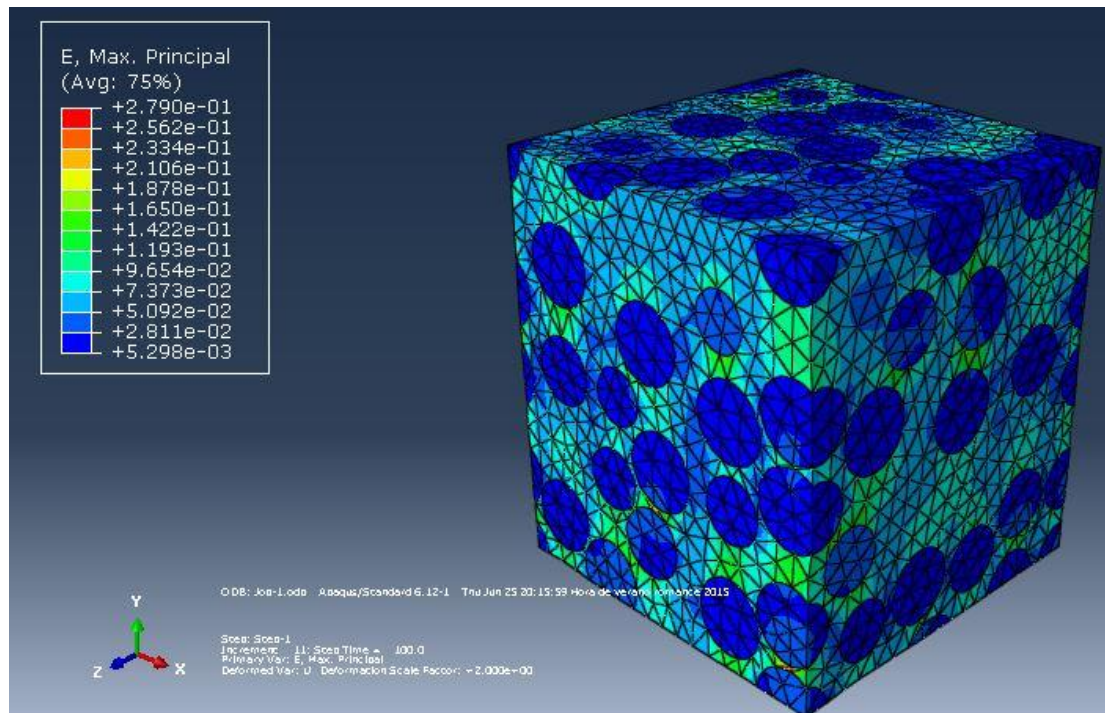


La ecuación de aproximación es la que sigue:

$$y = 15,181x^2 + 942,5x + 69995$$

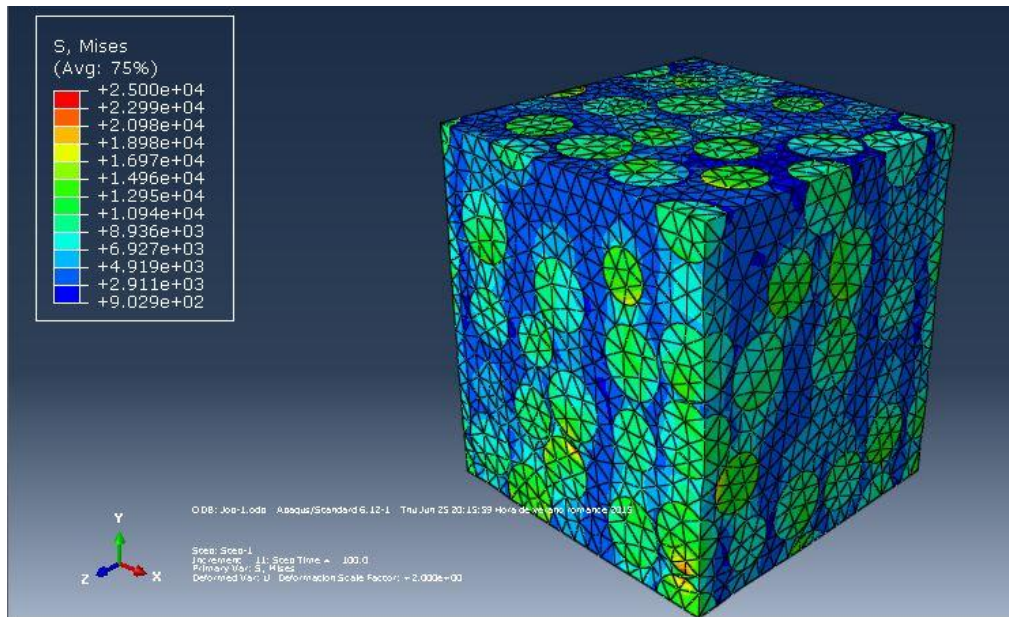
Y una correlación cuadrática  $R^2$  de 0.9991, lo que viene a decir, que el resultado de la aproximación polinómica es preciso, luego el error cometido en el cálculo de la línea de tendencia es despreciable.

A continuación, se presentará la deformación, tensión de Von Mises, y desplazamiento máximo para un RVE con un 35% de volumen de inclusiones en el material.

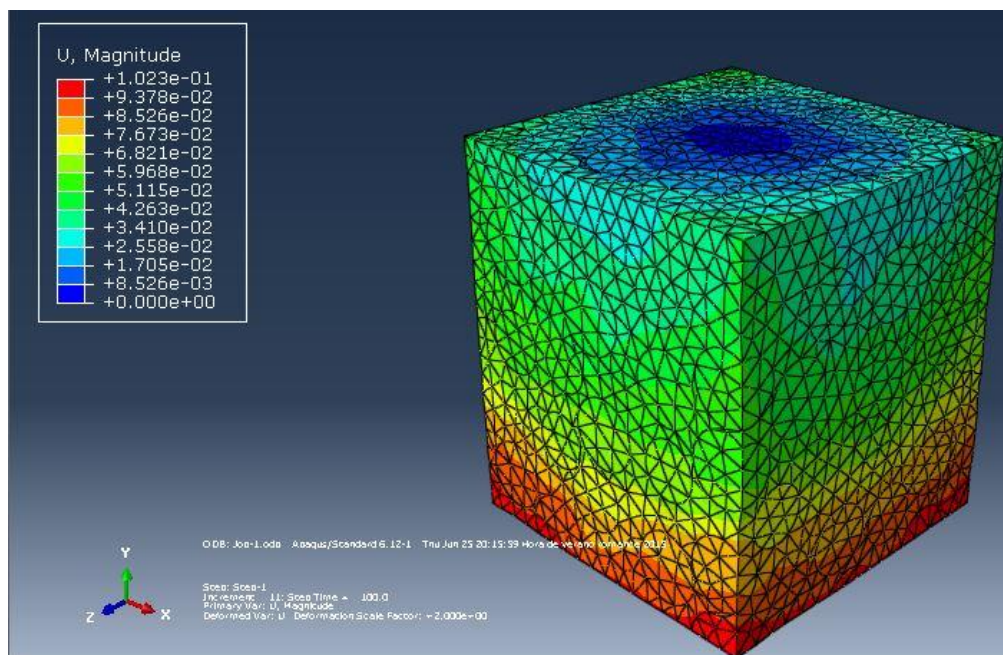


**Figura 41:** Deformación máxima principal en un modelo empleado para el cálculo de E y  $\nu$  con un 35% de volumen de SiC





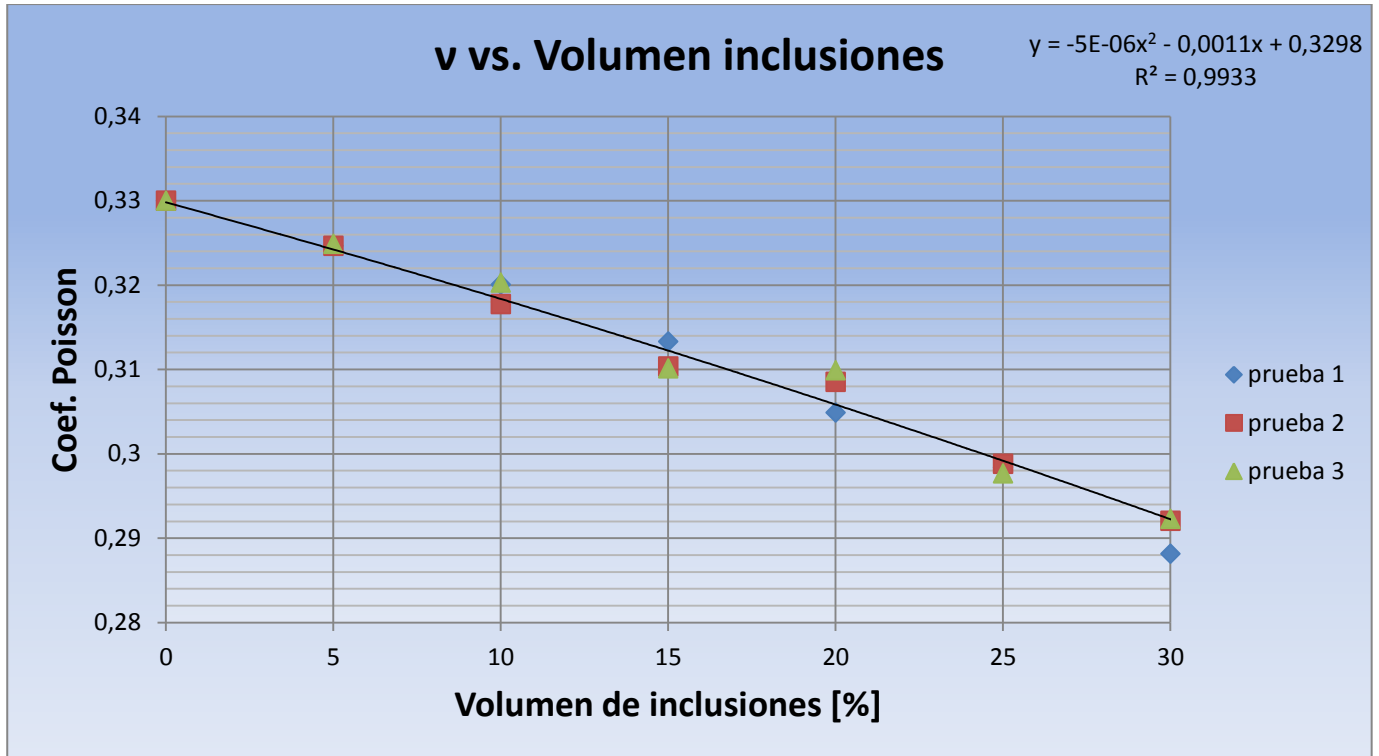
**Figura 42:** Tensión de Von Misses [MPa] en un modelo empleado para el cálculo de E y  $\nu$  con un 35% de volumen de SiC



**Figura 43:** Desplazamiento [mm] en un modelo empleado para el cálculo de E y  $\nu$  con un 35% de volumen de SiC

## 5.2. Coeficiente de Poisson ( $\nu$ )

En este caso, se presenta la variación del coeficiente de Poisson frente al volumen de inclusiones como sigue:



**Figura 44:** Gráfica que representa la variación del coeficiente de Poisson frente al volumen de inclusiones de SiC en la matriz de aluminio 6061

En este caso, se observa como la línea de tendencia es más suave que para el caso del cálculo del módulo de Young. De nuevo se puede volver a apreciar cómo el valor para el coeficiente para un caso del 0% coincide con el valor fijado para este material (aluminio 6061), sin embargo, la dispersión de datos es más alta que para los porcentajes homólogos en el cálculo del módulo de elasticidad.

Se puede ver una disminución de este coeficiente, lo que viene a concluir en que el material, a medida que aumenta el nivel de refuerzo, ofrece más resistencia al cambio de volumen de manera transversal.

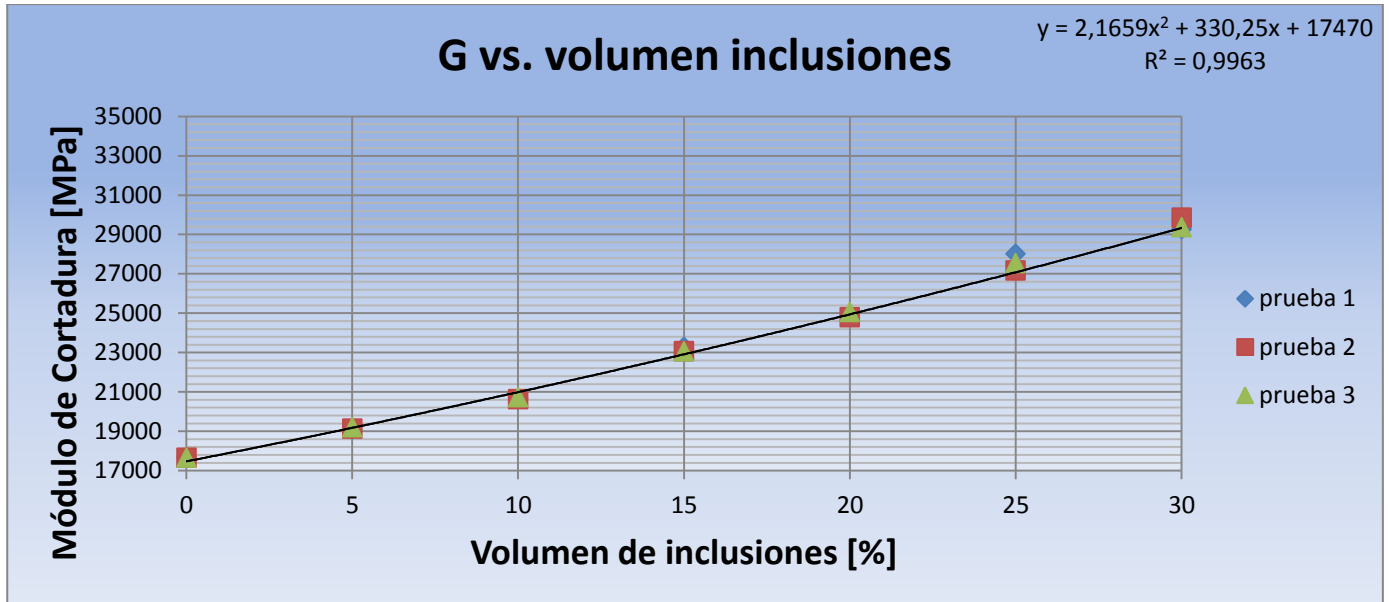
En este caso, si se compara el coeficiente de poisson para un material con un 0% de inclusiones, frente a otro con un 35%, el resultado es de una disminución de éste de un 12.44%, es decir, la resistencia transversal aumenta en 1.14 veces.

De nuevo se ajusta la tendencia a una curva polinómica de grado 2, con una correlación cuadrática  $R^2$  de 0.9933 cuya ecuación es la que sigue:

$$y = -5 \cdot 10^{-6}x^2 - 0,0011x + 0,3298$$

### 5.3. Módulo de cortadura (G)

La gráfica correspondiente a la variación del módulo de cortadura frente al incremento del volumen de inclusiones es la siguiente:



**Figura 45:** Gráfica que representa la variación del módulo de cortadura [MPa] frente al volumen de inclusiones de SiC en la matriz de aluminio 6061

En este caso, y dado que no se introduce de forma manual este parámetro en el programa, es necesario pedirle hacer el cálculo al 0% para conocer esta constante elástica.

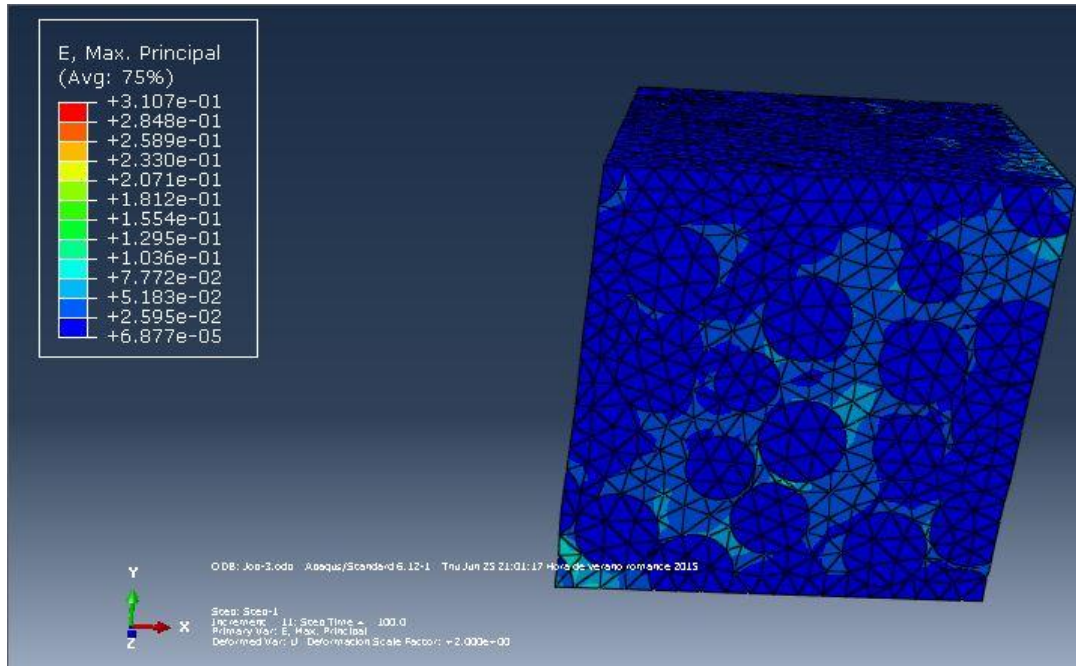
Se vuelve a apreciar un aumento de los valores de esta constante a medida que aumenta el volumen de inclusiones de la misma manera que lo hacía el módulo de elasticidad, de tal modo que se consigue un incremento de la resistencia a cortadura de 1.84 veces para un 35% de inclusiones.

Se ha escogido una línea de tendencia polinómica de grado 2 al igual que para el coeficiente de Poisson y módulo de elasticidad, su correlación cuadrática es de 0.9963, sin embargo, es difícil decidir la tendencia seguida, debido a que si se aplica una línea de tendencia lineal, la correlación cuadrática  $R^2$  es de 0.9954. Aun así, se seguirá escogiendo aquella que ofrezca menor error cuadrático, aunque el modelo lineal siga funcionando bien en este caso.

La curva para la tendencia cuadrática es la que sigue:

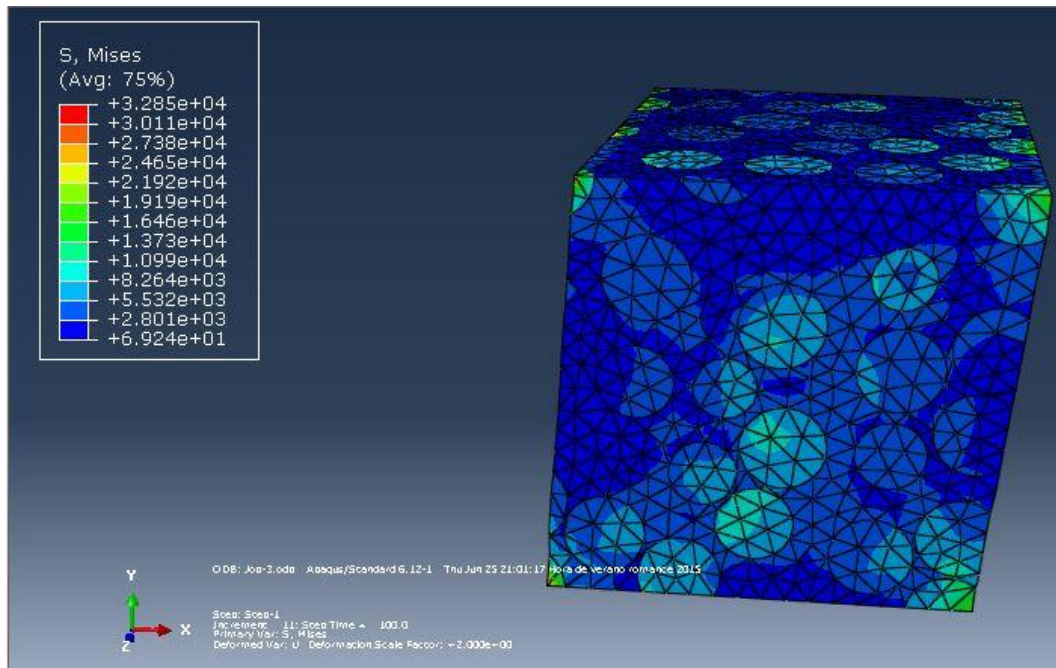
$$y = 2,1659x^2 + 330,25x + 17470$$

A continuación se muestran las imágenes del cubo deformado para la obtención del módulo de cortadura para un 35% de inclusiones. Se dará a conocer el campo de valores obtenidos para la deformación, tensión de Von Mises y desplazamiento.

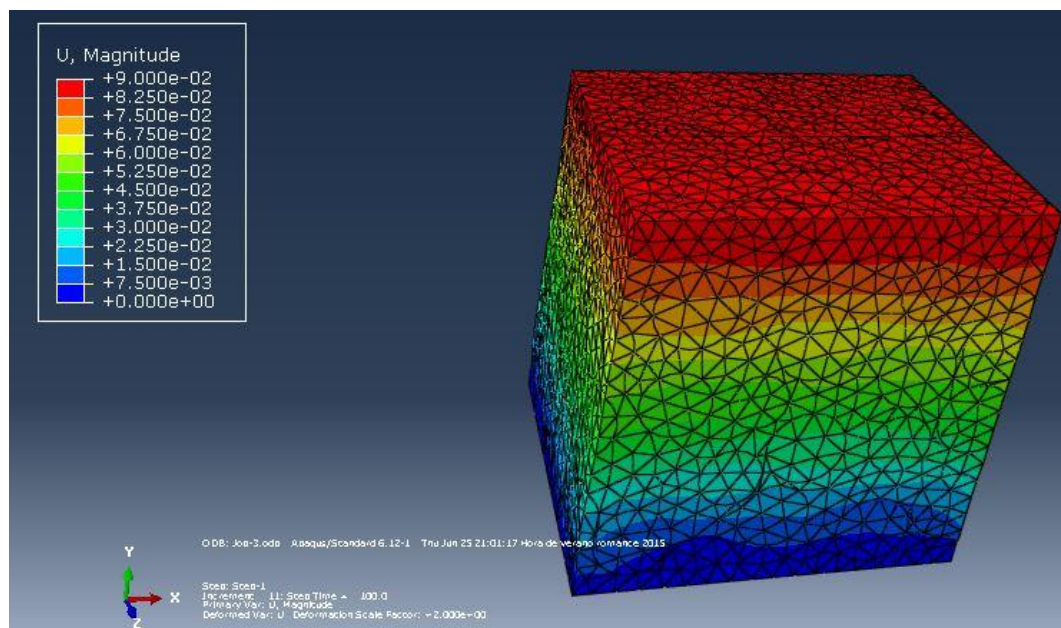


**Figura 46:** Deformación máxima principal en un modelo para el cálculo de G con un volumen de inclusiones de SiC del 35%





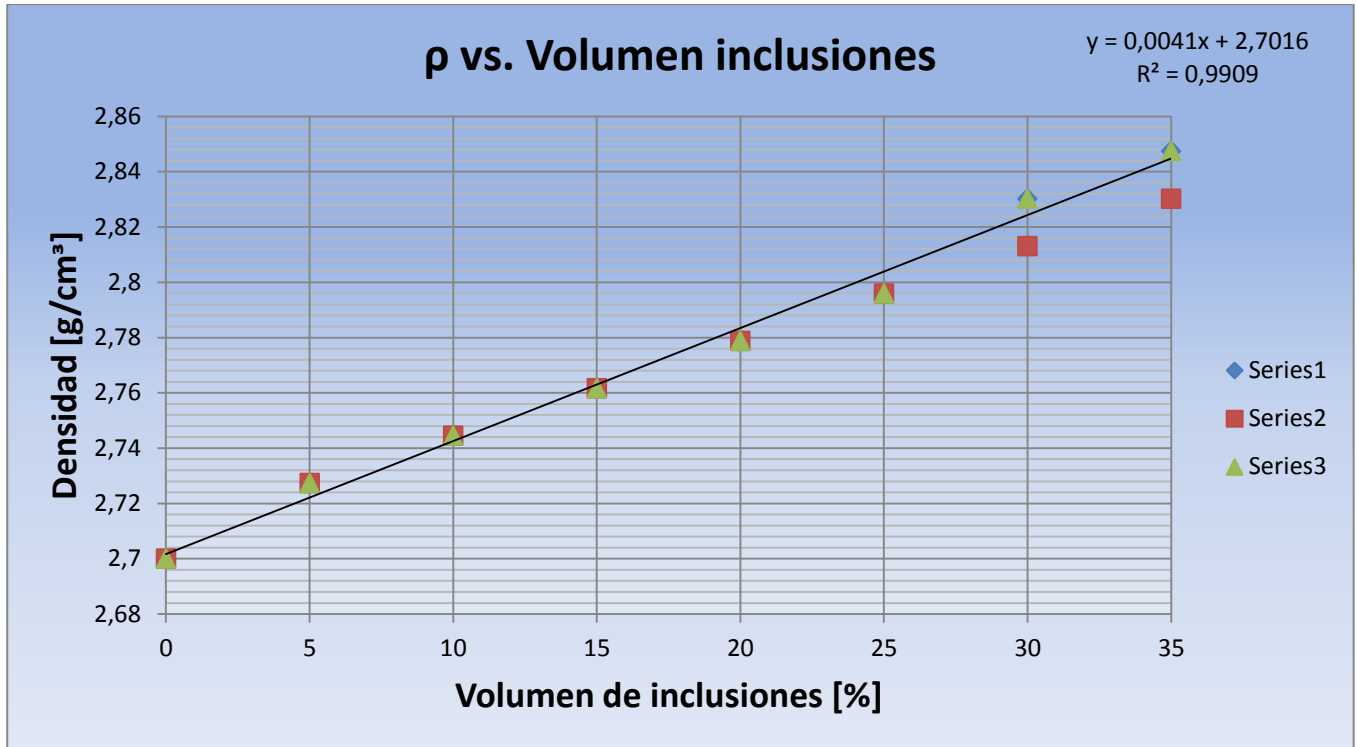
**Figura 47:** Tensión de Von Misses [MPa] en un modelo para el cálculo de G con un volumen de inclusiones de SiC del 35%



**Figura 48:** Desplazamiento [mm] en un modelo para el cálculo de G con un volumen de inclusiones de SiC del 35%

#### 5.4. Densidad ( $\rho$ )

De la misma manera que en los casos anteriores, se presenta la gráfica de la densidad en función del nivel de inclusiones:



**Figura 49:** Gráfica que representa la variación de la densidad del material [ $\text{g/cm}^3$ ] frente al volumen de inclusiones de SiC en la matriz de aluminio 6061

Se puede apreciar como aumenta la densidad del material de manera casi lineal frente al nivel de inclusiones cerámicas en la matriz, sin embargo, este aumento es muy poco relevante si lo comparamos con los incrementos en las constantes a cortadura y de elasticidad, es decir, se comprueba un aumento en la resistencia transversal de casi el doble para un 35% de inclusiones con sólo un aumento en la densidad de 1.048 veces frente a un porcentaje de un 0%.

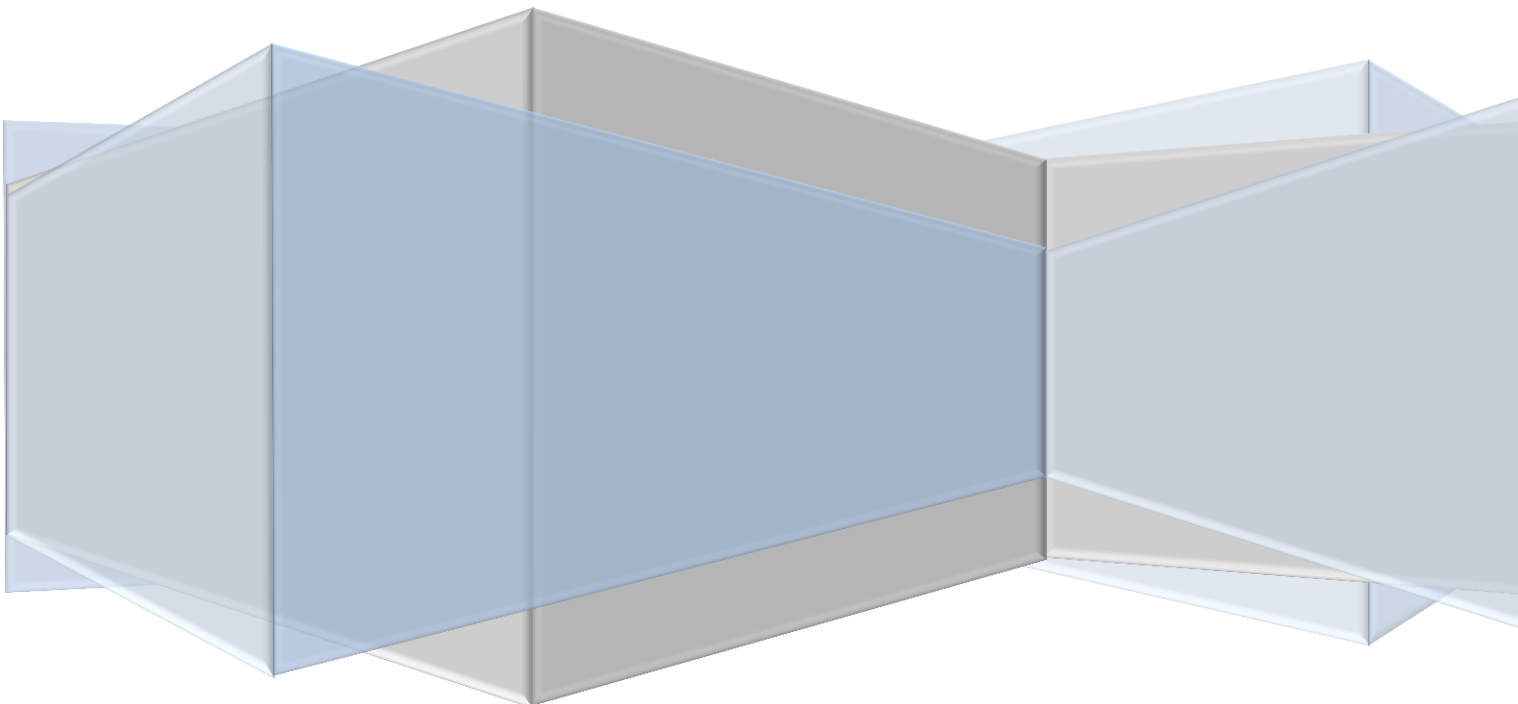
La recta de regresión lineal tiene como ecuación:

$$y = 0,0041x + 2,7016$$

Con un  $R^2$  de 0.9909.

# Capítulo 6:

## Conclusiones y trabajos futuros





## 6.1. Conclusiones

Las conclusiones a las que se ha podido llegar tras la realización de este proyecto son las siguientes:

- Se ha conseguido construir un script en lenguaje Python que automatiza el proceso de generación del modelo numérico, creación de las condiciones de contorno del problema, fijación de los parámetros de cálculo y lanzamiento del modelo para su análisis. Además, permite interactuar con el usuario ofreciendo la posibilidad de ajustar el volumen de inclusiones de material cerámico, el tamaño de arista del RVE y el tamaño de elemento de malla a través de la interfaz gráfica. Mediante este script se consigue un gran ahorro de tiempo, muy útil para este tipo de trabajos en los que se realizan numerosas simulaciones.
- Gracias al programa de cálculo por elementos finitos Abaqus/CAE, se ha conseguido obtener las principales propiedades mecánicas de una matriz metálica de aluminio con inclusiones esféricas de carburos de silicio tales como: Módulo de elasticidad (E), módulo de cizalladura (G) y coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), sin recurrir a ensayos destructivos. Mediante el método expuesto en este documento se obtienen propiedades mecánicas muy complejas de obtener mediante ensayos experimentales, como son el coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) y el módulo a cortadura (G).
- De forma efectiva, se ha comprobado que el módulo de Young y el de cortadura aumentan en tanto en cuanto aumenta el volumen porcentual de inclusiones en la matriz, lo que implica un aumento de la resistencia del material debido a la alta resistencia del material de refuerzo.
- Del mismo modo, el coeficiente de Poisson disminuye al aumentar el volumen de inclusiones en la matriz, lo que implica un aumento de la resistencia transversal del material, o resistencia al cambio de volumen, lo cual le hace ser un material más consistente que uno sin refuerzo.
- Se observa un aumento en la densidad del material, sin embargo, este se hace muy poco relevante frente al aumento de la resistencia del material tanto longitudinal como transversal y a cortadura, luego se mantiene la propiedad característica del aluminio (material ligero), con un aumento notable en su resistencia mecánica.

## 6.2. Trabajos futuros

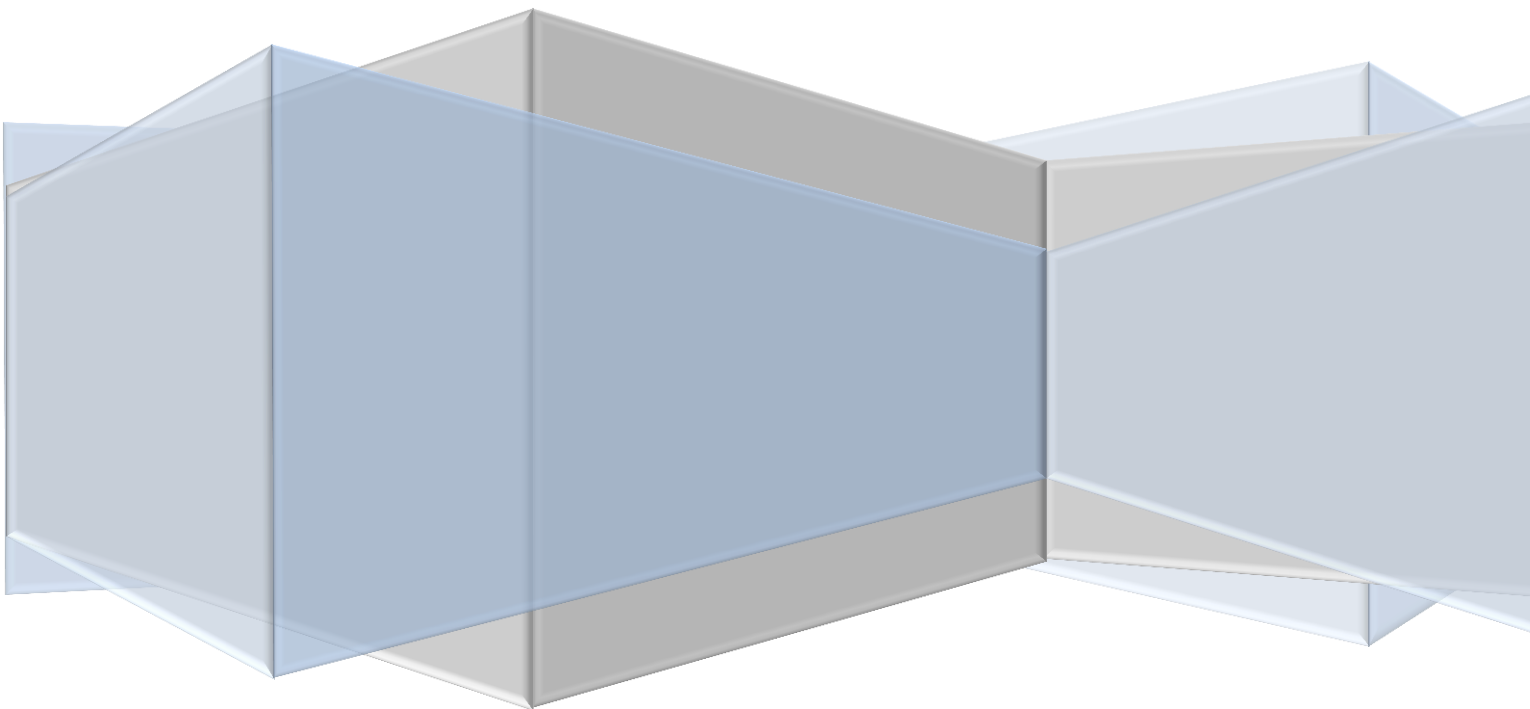
Con ánimo de incentivar este tipo de estudios, se proponen una serie de ideas con las que poder trabajar en el futuro.

- Uno de los grandes desafíos del programa fue sin duda, la construcción del código que automatizaba el proceso, de modo que era necesario, para simplificarlo, hacer una serie de consideraciones que sin duda, ahorran líneas de código y aligeraban el peso del programa, sin embargo, sería interesante, por ejemplo, crear una función que implementase esferas de diferente radio con lo que se conseguirían sin duda, la obtención de mayores volúmenes de inclusiones en el RVE, y por lo tanto, el estudio de sus propiedades en mayores porcentajes de inclusiones.
- Del mismo modo, sería interesante la introducción de partículas no esféricas, y estudiar el cambio en las propiedades mecánicas a partir de esta nueva consideración.
- Por otro lado, es necesario estudiar un modelo en que las propiedades del material sean anisótropas, ya que como se comentó en apartados anteriores, debido a la inclusión aleatoria de esferas en el material, es imposible considerar la isotropía del material si no es microscópicamente, es decir, tendrá un comportamiento diferente según la dirección principal que se estudie.

Además, ya que se trata de encontrar un modelo que reproduzca de la manera más fidedigna posible este tipo de materiales, es posible estudiar la plastificación del material (elasto-plasticidad), o incluso, probar con otro tipo de modelos como la visco-elasticidad, visco-plasticidad, visco-elasto-plasticidad, o incluso estudiar la influencia de la temperatura en este tipo de materiales.

# Capítulo 7:

## Planificación y presupuesto



## 7.1. Planificación

En cualquier proyecto es siempre necesaria una buena definición de las tareas a completar, y el tiempo proporcionado para la realización de estas tareas bajo la supervisión de fuentes con experiencia en el campo, o lo que es lo mismo, esclarecer la división de trabajos optimizando los recursos de tiempo para conseguir una entrega dentro de plazos de tiempo razonables.

Sin embargo, en muchas ocasiones superar dichos plazos de entrega supone incurrir en penalizaciones y gastos adicionales, por lo que será de gran importancia la realización de este apartado.

Se ha utilizado el programa Open Project, versión gratuita de MS-Project de Microsoft. Ambos programas son muy parecidos, por lo que la toma de datos y la visualización de resultados es prácticamente idéntica.

Así pues, es necesario hacer una serie de consideraciones antes de presentar la organización del proyecto para facilitar la comprensión del plan de trabajo:

- En primer lugar, las fechas de comienzo y fin no son reales, ya que no se ha tenido en cuenta ni la búsqueda ni la asignación de TFG, así como tampoco la obtención de los programas y la revisión final del tutor del proyecto.

Por lo tanto, se considerarán las fechas de inicio y fin correspondientes a la realización personal del trabajo, sin estar éste sujeto a condiciones externas. Así pues, las hipótesis iniciales serán:

- Inicio del proyecto coincidente con el inicio de la búsqueda de información necesaria para la realización del informe.
- Se considera que los programas necesarios han sido obtenidos mucho antes de la realización del proyecto.
- La fecha de fin del proyecto corresponderá a la fecha fin de revisión personal del proyecto.

- Las modificaciones después de la revisión final del proyecto por parte del tutor añadirá un tiempo adicional que se supondrá muy pequeño comparado con el grueso del trabajo personal, que abarcará desde la fecha de inicio hasta la fecha fin del proyecto calculada por el programa.
- En segundo lugar, se dividirá el trabajo en tres grandes bloques:
  - Documentación: implica la búsqueda de bibliografía necesaria para comenzar a realizar el proyecto.
  - Generación del modelo: se refiere tanto al diseño de la estructura seleccionada por ordenador, como el cálculo de las distintas propiedades, análisis de sensibilidad, escritura del script, y aprendizaje del lenguaje de programación, en este caso, lenguaje Python.
  - Elaboración de la memoria: bloque que contiene los tiempos de duración en la redacción del informe a presentar.
- Se ha tenido en cuenta una media de 4 horas de trabajo al día, en horario de tarde, desde las 5 hasta las 9, con sábados y domingos no laborables. Por el contrario, no se han tenido en cuenta días festivos, con lo que se supondrán 5 días de trabajo semanales fijos.
- Se han impuesto una serie de restricciones entre tareas de tal manera que expliquen las deliberaciones personales que se hicieron sobre dicha tarea, estas son:
  - El planteamiento del problema y la búsqueda de información para Python se considera que pueden empezar a la vez, de modo que serán las dos tareas que den comienzo al inicio del proyecto. Además, la redacción de la introducción del proyecto puede comenzar al inicio del trabajo.
  - El aprendizaje del lenguaje Python, y la elaboración del programa podrá empezar después de la recogida de información de Python, y después de haber planteado el problema. Este punto ocupará el grueso del trabajo realizado, con un coste de tiempo personal de 90 días.
  - La redacción del punto de la memoria “Materiales compuestos” empezará una vez redactada la introducción. Además, podrá empezar un día después de que empiece la tarea de “Introducción y definición de los MC’s”, y no podrá acabar antes de un día después del fin de la última tarea de recogida de información “Aplicaciones del material de estudio”.

Se ha dejado un margen de un día para permitir la lectura de la bibliografía y la puesta en orden de la misma.

- El resto de recogida de información empezará una vez termine la recogida de información de Python.
- El resto de tareas del bloque “Generación del modelo” empezarán una vez termine la tarea de “aprendizaje y elaboración del programa”.
- La redacción de la tarea “Generación del modelo numérico” en el bloque “Elaboración de la memoria” empezará una vez se termine la tarea “aprendizaje y elaboración del programa”, y no antes de que termine la tarea “materiales compuestos”.
- El resto de tareas del bloque “Elaboración de la memoria” empezará una vez terminada la tarea “Generación del modelo numérico”.

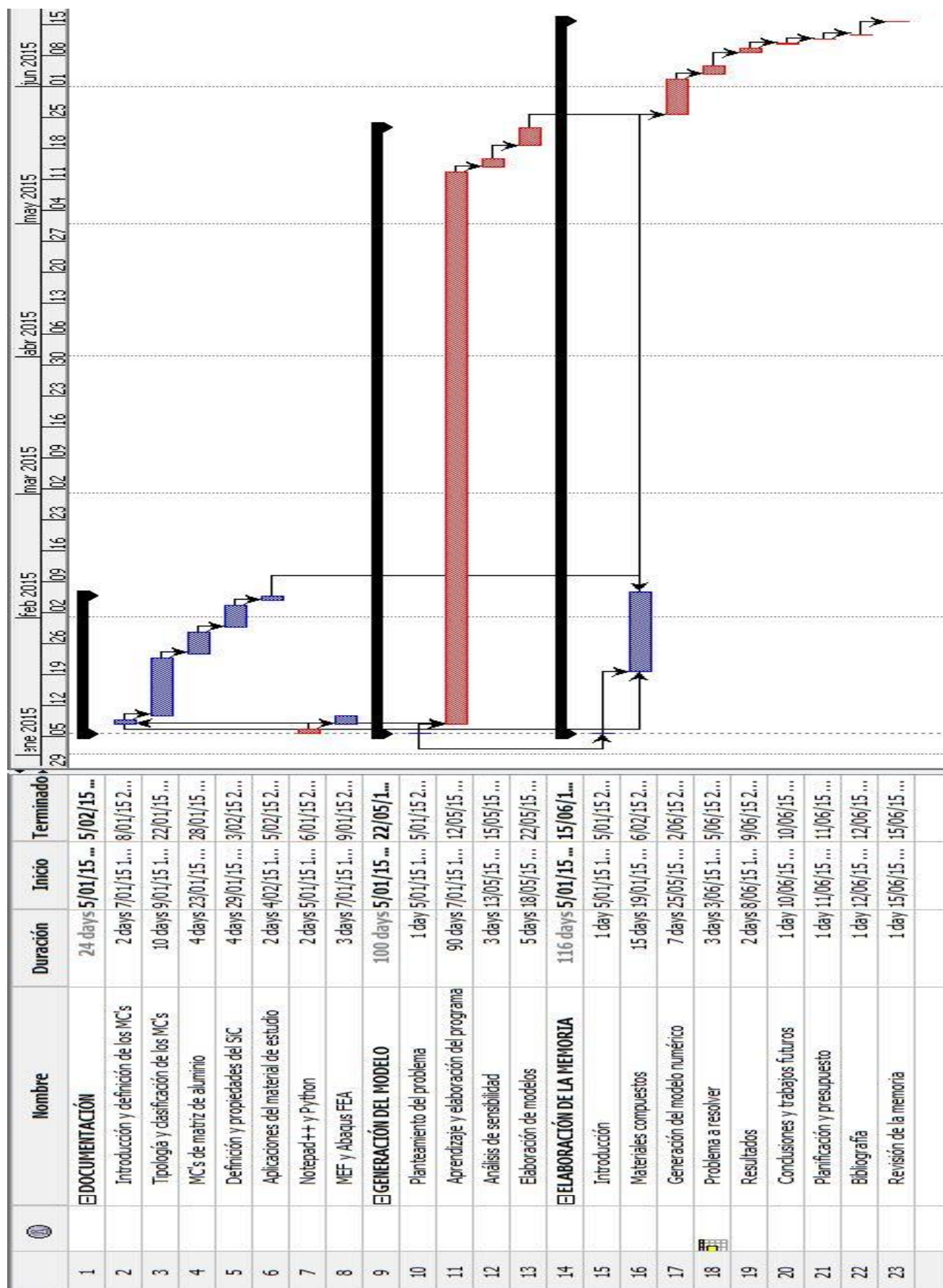


Figura 50: Diagrama de Gantt del proyecto

## 7.2. Presupuesto

Para el cálculo de los costes medios de este trabajo, se tendrán en cuenta varios puntos. Lo primero será conocer la cantidad de horas invertidas. Se han empleado 116 días en la realización completa del proyecto, con una media de 4 horas de trabajo al día, eso supone 464 horas de trabajo totales.

Por otro lado, se tendrán en cuenta los costes de los equipos empleados, así como los software de cálculo utilizados.

Por último, se calculará el precio del trabajo del profesor-tutor.

**Tabla 3:** Desglose del presupuesto del proyecto

Coste personal				
	Profesión	Nº de horas empleadas	Coste (€/hora)	Coste total (€)
Tutor	Ingeniero	60	40	2400
Alumno	Estudiante	464	20	9280
Coste software				
	Precio (€)	Periodo usado (meses)	Periodo de amortización (meses)	Coste total (€)
Abaqus/CAE	6000	6	24	1500
MS-Project	120	6	24	30
Coste hardware				
	Precio (€)	Periodo usado (meses)	Periodo de amortización (meses)	Coste total (€)
acer aspire 5750G	550	6	24	137,5
<b>Coste personal+Coste Software+Coste hardware=</b>				<b>13347,5</b>

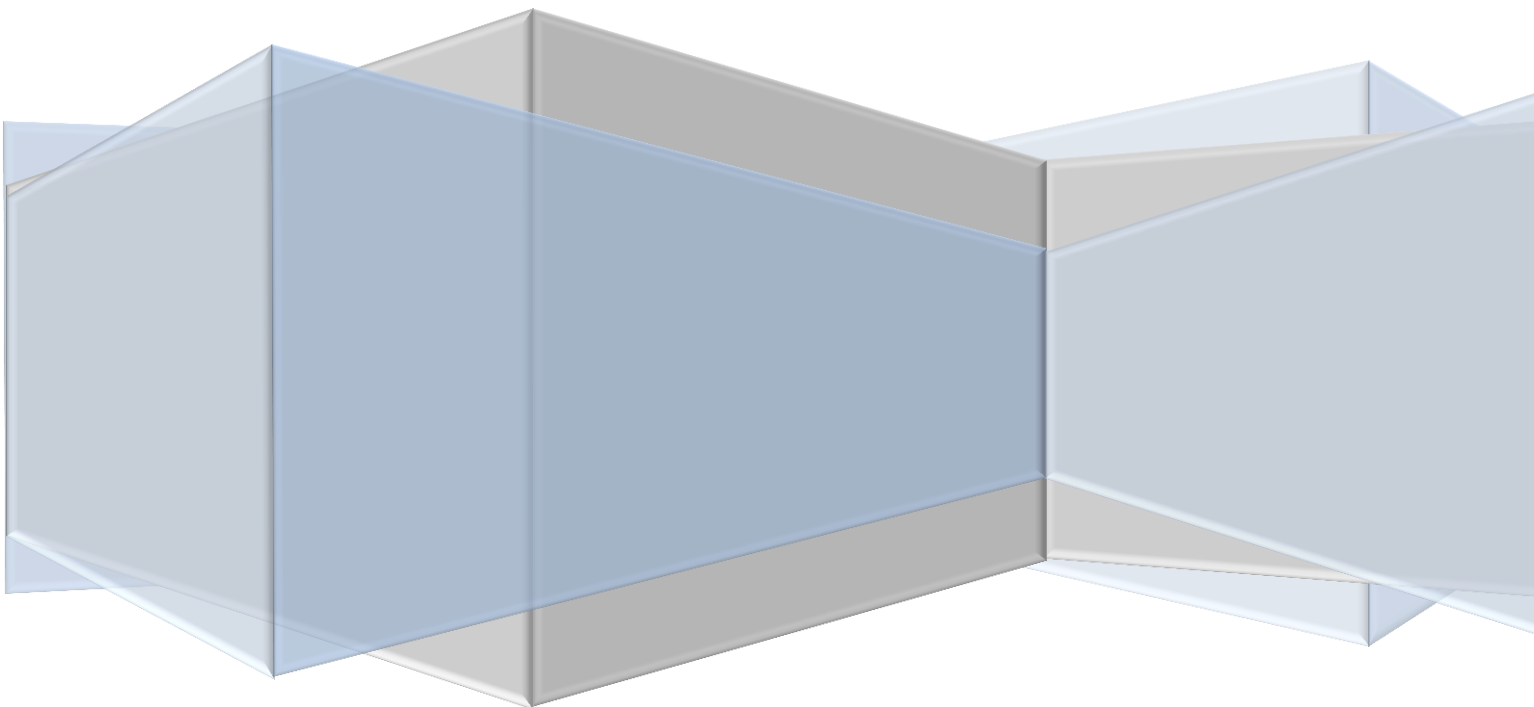
Para el cálculo de la amortización de los equipos se supuso un índice de amortización del 100% y se calculó mediante la expresión:

$$\text{Coste amortización (€)} = \frac{\text{Periodo usado}}{\text{Periodo de amortización}} \cdot \text{Precio}$$



# Capítulo 8:

## Bibliografía



[1] MORAL ALBERTO, MARAR NOGUEIRA. Materiales de última generación y materiales eficientes: Materiales Compuestos – Composites [en línea]. Escuela de Arquitectura de la Universidad de Alcalá de Henares, 2007. Master Oficial en Proyecto de Arquitectura y Ciudad. Disponible en:

[https://portal.uah.es/portal/page/portal/GP\\_EPD/PG-MA-ASIG/PG-ASIG-200637/TAB42359/Introducci%F3n%20Composites%20%28Alberto%20Moral%20%2B%20Marar%20Nogueira%29.pdf](https://portal.uah.es/portal/page/portal/GP_EPD/PG-MA-ASIG/PG-ASIG-200637/TAB42359/Introducci%F3n%20Composites%20%28Alberto%20Moral%20%2B%20Marar%20Nogueira%29.pdf)

[2] Refuerzo de estructuras de hormigón. CarbonConcrete [web]. Disponible en:

<http://www.carbonconcrete.es/HTLM/es/Material%20Compuesto.html>

[3] Introduction to composite materials. Composites UK Trade Association [web]. Disponible en:

<https://compositesuk.co.uk/composite-materials>

[4] MÁRQUEZ, RONALD. Materiales de Ingeniería Química. Capítulo 8: Materiales compuestos [en línea]. Universidad de Los Andes (Venezuela). Disponible en:

[http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/marquezronald/wp-content/uploads/2009/08/8\\_Materiales-Compuestos1.pdf](http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/marquezronald/wp-content/uploads/2009/08/8_Materiales-Compuestos1.pdf)

[5] CAMPBELL, F.C. Structural Composite Materials. ASM International, 30 Noviembre 2010. ISBN: 978-1-61503-037-8.

[6] HARRIS, BRYAN. Engineering Composite Materials. The institute of Materials, London 1999. ISBN: 1861250320, 9781861250322

[7] SÁNCHEZ SÁEZ, SONIA. BARBERO POZUELO, ENRIQUE. GARCÍA CASTILLO, SHIRLEY. Tema 1: Introducción a los materiales compuestos [en línea]. Máster en Mecánica Estructural Avanzada. Universidad Carlos III de Madrid. Disponible en:

[http://ocw.uc3m.es/mecanica-de-medios-continuos-y-teoria-de-estructuras/mecanica-de-materiales-compuestos/material-de-clase-1/introduccion/at\\_download/file](http://ocw.uc3m.es/mecanica-de-medios-continuos-y-teoria-de-estructuras/mecanica-de-materiales-compuestos/material-de-clase-1/introduccion/at_download/file)

[8] MARTÍNEZ POVEDA, SANTIAGO. Lecturas complementarias: Materiales compuestos. Ingeniería Gráfica: Representación Normalizada de Piezas de Material Compuesto. Universidad Politécnica de Madrid.

[9] H. ROJACZ, M. VARGA, H.KERBER, H.WINKELMANN. Processing and wear of cast MMCs with cemented carbide scrap [en línea]. Journal of Materials Processing Technology, recibido en: 19-07-2013; aceptado en: 28-01-2014. Disponible en:

<http://crossmark.crossref.org/dialog/?doi=10.1016/j.jmatprotec.2014.01.011&domain=pdf>

[10] H. D. MIRANDA, F. M. ANDRADE PIRES, A. T. MARQUES. Impact of the geometry of inclusions at the micro-scale on the overall stochastic properties. En: Mechanics of Advance Materials and Structures [en línea]. J.N Reddy (Ed.), 2014. Disponible en:

<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15376494.2014.938792>

[11] EDIL DA COSTA, CÉSAR. VELASCO LÓPEZ, FRANCISCO. TORRALBA CASTELLÓ, JOSE MANUEL. Materiales compuestos de matriz metálica, I parte: tipos, propiedades y aplicaciones [en línea]. Revista de metalurgia de Madrid (CSIC), recibido en: 23-09-1999; aceptado en: 05-04-2000. Disponible en:

<http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/viewFile/570/580>

[12] PRESAS MATA, MARINA. Microestructura y propiedades mecánicas del SiC biomórfico. Diseño avanzado de estructuras. Fundamentos y aplicaciones. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid.

[13] NAVARRO UGENA, CARLOS. PÉREZ CASTELLANOS, JOSÉ LUIS. Capítulo 9: Introducción al método de los elementos finitos. Aplicación a la mecánica de sólidos [en línea]. Ingeniería Estructural. Universidad Carlos III de Madrid. Disponible en:

[http://ocw.uc3m.es/mecanica-de-medios-continuos-y-teoria-de-estructuras/ingenieria-estructural/material-de-clase-1/apuntes/Capitulo\\_9.-Introduccion\\_al\\_metodo\\_de\\_los\\_elementos\\_finitos.pdf/at\\_download/file](http://ocw.uc3m.es/mecanica-de-medios-continuos-y-teoria-de-estructuras/ingenieria-estructural/material-de-clase-1/apuntes/Capitulo_9.-Introduccion_al_metodo_de_los_elementos_finitos.pdf/at_download/file)

[14] ROMERO HERMIDA, MARÍA ISABEL. Efecto de la composición de los gases de combustión en la captura de CO<sub>2</sub> por nanotubos de carbono: Un estudio de simulación. Capítulo 4: Métodos de simulación. Máster en Ingeniería Ambiental. Universidad de Sevilla.

[15] Abaqus Unified FEA. Dassault Systemes [web]. Disponible en:

<http://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abacus>

[16] Notepad++ [web]. Disponible en:

<https://notepad-plus-plus.org/>

[17] Python [web]. Disponible en:

<https://www.python.org/>

[18] Dassault Systemes. Abaqus Scripting User's Reference Manual 6.12.

[19] OVERVELDE J.T.B. Learn Abaqus Script In One Hour, 12 Diciembre 2010 [en línea]. Disponible en:

<http://www.overvelde.com/>

[20] PELISSOU C. BACCOU J. MONERIE Y. PERALES F. Determination of the size of the representative volume element for random quasi-brittle composites [en línea], recibido en: 18-12-2008; aceptado en: 16-02-2009. Disponible en:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020768309001334>

[21] SEGURADO J. LLORCA J. A numerical approximation to the elastic properties of sphere-reinforced composites. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, recibido en: 18-12-2001; aceptado en: 11-03-2002. Disponible en:

[www.elsevier.com](http://www.elsevier.com)

[22] A.A. CERIT, M.B. KARAMIŞ, F. NAIR, K. YILDIZLI. Effect of Reinforcement Particle Size and Volume Fraction on Wear Behavior of Metal Matrix Composites. Journal of the Balkan Tribological Association. Disponible en:

<http://www.scibulcom.net/>

[23] ENG-TIPS.COM Engineering Forums. Abaqus script: Set definition [web]. Disponible en:

<http://www.eng-tips.com/viewthread.cfm?qid=231225>

[24] Aircraft Materials. Aluminium Alloy 6061 [web]. Disponible en:

<http://www.aircraftmaterials.com/data/aluminium/6061.html>

[25] AZO Materials. Aluminium Alloy 6061 - Composition, Properties, Temper and Applications of 6061 Aluminium [web]. Disponible en:

<http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=3328>

[26] Accuratus Standard Ceramic Products. Silicon Carbide, SiC Ceramic properties [web]. Disponible en:

<http://accuratus.com/silicar.html>

[27] ZHIGILEY, LEONID. Introduction to Atomistic Simulations. Boundary Conditions. University of Virginia, MSE 4270/6270.

[28] WASSER, ROBERT. Periodic Boundary Conditions [en línea]. Center for Polymer Studies (CPS), Boston University. Disponible en:

<http://cps-www.bu.edu/Wasser/robert/work/node6.html>

[29] Iberisa. Librería de elementos 3-D de FEMAP y NX Nastran [web]. Disponible en:

[http://www.iberisa.com/productos/femap/femap\\_elementos\\_3d.htm](http://www.iberisa.com/productos/femap/femap_elementos_3d.htm)

[30] Medida del módulo de cizallamiento [en línea]. Universidad del País Vasco. Disponible en:

[http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/solido/din\\_rotacion/torsion/torsion.htm](http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/solido/din_rotacion/torsion/torsion.htm)